ELASTICITÄT UND FESTIGKEIT

DER

KNOCHEN.

ANATOMISCH-PHYSIOLOGISCHE STUDIE

VON

AUGUST ANTINOUS RAUBER,

AUSSERORDENTLICHER PROFESSOR AN DER UNIVERSITÄT ZU LEIPZIG.

MIT 2 LICHTDRUCKTAFELN.

LEIPZIG,

VERLAG VON WILHELM ENGELMANN.

1876.

Uebersetzungsrecht vorbehalten.

Vorwort.

Unter den zahlreichen Körpern, welche im Laufe der Zeit der Gegenstand von Untersuchungen über Elasticität und Festigkeit geworden sind, nehmen diejenigen, welche die Hauptstützorgane des Wirbelthierkörpers darstellen, die Knochen, eine auffallend zurückgesetzte Stellung ein. Die äussere Gestalt der Knochen ist von der Mehrzahl der Geschöpfe so genau bekannt, dass nur der Vergleichung noch ein breiterer Spielraum offen ist. Die Grundzüge der Architectur der Knochen liegen seit einigen Jahren aufgedeckt vor uns. Der mikroskopische Bau des fertigen Knochens ist, Dank den Bemühungen rastloser Arbeit, auf einer Stufe der Vollendung angelangt, die schon fast der Tragweite unserer gegenwärtigen optischen Hülfsmittel entspricht. Selbst die Umrisse der Entstehungsgeschichte der Knochen nehmen allmälig schärfere Formen an und gestatten einen weitreichenden Ausblick. Alle die von der Natur getroffenen grossen Vorbereitungen für die Anlage der Knochen, der Abschluss ihres Wachsthums und ihre fernere Ernährung laufen aber schliesslich in dem einen Ziele zusammen, diejenige Leistungsfähigkeit des ganzen Gerüstes zu schaffen, welche als die dem besonderen Organismus passendste in die Erscheinung tritt.

Diese Leistungsfähigkeit ist einer Prüfung zu unterwerfen. Nicht die Vermuthung grosser Widerstandskräfte, die der beständige merkwürdig gefahrlose Gebrauch der Knochen im Leben hinreichend begründet, genügt dem wissenschaftlichen Denken; sondern die Gesetze ihrer Widerstandskraft sind zu ermitteln und in Zahlen auszudrücken.

Ihre Widerstandskraft ist wesentlich abhängig 1) von der Substanz, aus welcher die Knochen bestehen, in der Art, dass ein anderes Material eine geänderte Form der Knochen bedingen würde; 2) von der Form, in welcher die Substanz zur Verwendung gelangt, sei es hinsichtlich des mikroskopischen Baues oder der Gestalt des ganzen Knochens.

Es handelt sich aber nicht allein darum, die Knochenform als etwas Gegebenes aufzufassen und mit ihr und der Kenntniss der Elasticität und Festigkeit der Knochensubstanz die Leistungsfähigkeit der einzelnen Knochen zu untersuchen, sondern in höherem Grade darum, aus der Kenntniss der Kräfte, von welchen die Knochen bei ihrer Leistung in Anspruch genommen werden, und mit der Kenntniss der Kräfte der Substanz, aus der sie gebildet sind, immer tiefer in das Verständniss der Knochenformen selbst einzudringen. Denn es unterliegt keinem Zweifel mehr, dass wir die Knochenformen um so besser werden begreifen lernen, je weiter wir in der Anwendung mechanischer Gesetze auf ihre Erklärung vorgehen.

Ich begann meine Untersuchungen mit der Bestimmung der rückwirkenden Festigkeit und habe an anderem Ort schon einige Mittheilungen hierüber gemacht. Es zeigte sich aber bald die Nothwendigkeit, auch die übrigen Arten der Festigkeit in das Bereich zu ziehen, wenn das Gewonnene nicht Bruchstück bleiben sollte. So folgte die Prüfung der Biegungsverhältnisse, der Schub- und Torsionsfestigkeit. Ueber die genannten Festigkeitsarten lagen noch keine früheren Angaben vor. Bestimmungen der absoluten Festigkeit, die schon bearbeitet worden war, konnten aber um so weniger übergangen werden, als die vorhandenen Angaben in ihren Werthen beträchtlich von einander abstehen.

Der Physiker ist mit Recht bestrebt, die reinsten, gleichartigsten Körper für Untersuchungen dieser Art zu verwenden, wie Krystalle, Flüssigkeiten, Gase u. s. w.; wie Kautschuk, Seide u. s. w. Eine mit den genannten Stoffen irgend vergleichbare Homogenität besitzen die Knochen nicht, wie von vornherein bekannt war. Aber das Material musste eben in der Reinheit und Gleichmässigkeit genommen werden, wie die Natur es liefert. Es zeigte sich indessen bald, dass die Beschaffenheit sehr wohl geeignet war, zu bestimmten Ergebnissen gelangen zu lassen. Ausserdem musste ja der Einfluss der Structur auf die Leistung selbst ein Gegenstand der Prüfung sein.

Wuchs die Arbeit auch langsam und mit langen Unterbrechungen, so nahm sie nicht zu, ohne während der Untersuchung diejenige Befriedigung zu gewähren, welche die wachsende Einsicht in unerklärte Verhältnisse gestattete. Nicht als ob ich mich dem Glauben überliesse, dass das Ziel, welches sich die Untersuchung gesteckt, schon vollständig erreicht wäre. Mancherlei in dem ausgedehnten Gebiete, das sie betrat, ist eines weiteren Ausbaues fähig und bedürftig; ich selbst gedenke diesen und jenen nur angedeuteten Punkt zur Erledigung zu bringen. Dennoch glaube ich mich der Hoffnung hingeben zu dürfen, es werde die vorliegende Arbeit, mit dem ihr gegenwärtig zukommenden Abschluss, dazu geeignet sein, eine klaffende Lücke unserer osteologischen Kenntnisse ausfüllen zu helfen.

Von einer Abbildung der Apparate, die ich mir zu den Versuchen anfertigen liess, ist Umgang genommen worden. Man findet die grundlegenden Constructionen in den grösseren Lehrbüchern der Mechanik. Dem Zweck entsprechende Abänderungen sind an geeigneter Stelle angegeben.

Eine nicht geringe Förderung erhielten diese Untersuchungen durch den mit echter Liebenswürdigkeit gewährten vielfältigen Rath und die werkthätige Unterstützung des Directors des hiesigen physikalischen Institutes, Prof. Dr. Hankel, welchem ich hiermit meinen verbindlichsten Dank erstatte.

Leipzig, September 1875.

A. Rauber.

Inhalt.

Seite

Vorwort III

I. Abschnitt. Theorie des Knochengerüstes.

Das Knochenmaterial nach Mischung, Dichtigkeit und Gefüge 2
Muskelursprünge 10
Verhältniss des Knochengewichtes zum Muskelgewicht 17

II. Abschnitt. Elasticität und Festigkeit der Knochensubstanz.

Vorbemerkungen 19
Frühere Untersuchungen 22
Absolute Festigkeit 23
Dehnungsversuche am Knochen- und Rippenknorpel 28
Rückwirkende Festigkeit 28
Rückblick 33
Biegungselasticität und -Festigkeit 35
Biegungsapparat, Herstellung der Stäbchen, Methode ihrer Biegung 36
Biegungsversuche. Einfluss der Dimensionen, der Druckrichtung und der Herkunft der Stäbchen. Elasticitätsgrösse 38
Einfluss des Feuchtigkeitszustandes 46
Einfluss der Temperatur 48
Elasticitätsgrenze, Proportionalität der Biegungen und Belastungen 50
Biegungsfestigkeit 57
Beurtheilung der Biegungsergebnisse 58
Schub- und Torsionsfestigkeit 62

Anhang. Der Knochen als Ganzes 65

Versuche über die Strebfestigkeit der Knochen 67
Einfluss des Längs- und Querschnitts auf die Strebfestigkeit 69
Abweichung der Knochenaxen von der Geraden 69
Wirkung des Querschnitts 70

Ergebnisse 72

I. Abschnitt.

Theorie des Knochengerüstes.

Wenn die Erörterungen dieses Abschnitts unter der voranstehenden Aufschrift zur Darstellung gelangen, so ist meine Absicht nicht die Auseinandersetzung derjenigen Vorgänge, welche die Anlage von Bindesubstanzmassen in der Grundform des späteren Knochengerüstes herbeiführen. Diese Vorgänge hängen zusammen mit den Gestaltungen der embryonalen Keimblätter und sind uns nach den wesentlichsten formalen Verhältnissen durch Remak's Forschungen auf entwicklungsgeschichtlichem Felde schon bekannt. Auch ist es nicht mein Ziel, auf die Erkenntniss der Bedingungen auszugehen, unter welchen die Bildung von Knochengewebe, die Verknöcherung, zur Erscheinung gelangt. Ist doch gegenwärtig noch auf langer Linie der Streit entbrannt, nicht über die Ursachen, sondern den Modus der Verknöcherung und des Knochenwachsthums; ein Gebiet, zu dessen Aufhellung ich übrigens bei andrer Gelegenheit einen Beitrag liefern zu können hoffe. Die folgende Darstellung ist vielmehr bestrebt, die Knochenformen sowohl als auch ihre unmittelbaren Vorläufer unter dem Gesichtspunkt einer Function im mathematischen Sinn zur Anschauung und zur Entwicklung zu bringen. Sie anticipirt dabei in Etwas die Ergebnisse eines späteren Abschnitts, so weit es zur Begründung nöthig erscheint.

Indessen ist in der Ausführung dieser Aufgabe nicht der ganze Zweck dieses Abschnitts enthalten, sondern der letztere hat zugleich jene Bestimmung zu erfüllen, den darauffolgenden Untersuchungen über die Elasticitäts- und Festigkeitsverhältnisse der Knochen zur Grundlage zu dienen. Diese können nicht zur geeigneten Darstellung gelangen, wenn nicht die Substanz in chemischer und anatomischer Richtung genügend beleuchtet worden ist. Solche Rücksicht bestimmte die Gliederung des Materials und stellte die Erledigung der ersten Aufgabe dieses Abschnitts in den Hintergrund, auf welchem, soweit der Zweck es erforderte, die bekannten Eigenschaften der Knochen und Knorpel kurz gesammelt, angedeutet, oder wenn es nöthig war mit Zusätzen versehen worden sind.

Für alles Uebrige verweise ich auf die zugehörigen Lehrbücher und die besonders in den letzten Jahren rasch gewachsene specielle Literatur der Knochen.

Das Knochenmaterial nach Mischung, Dichtigkeit und Gefüge.

1) Verbindungsweise zwischen dem Knochenknorpel (Osseïn) und den mineralischen Knochenbestandtheilen.

Das von der Knochenhaut und dem Mark völlig befreite und getrocknete Knochengewebe hat, wie man weiss, eine für jede Thierart sehr constante chemische Zusammensetzung. Beim Menschen finden sich in demselben 32 Procent organischer Bestandtheile, 68 Procent Salze. Letztere bestehen aus 84 Procent dreibasisch phosphorsauren Kalks, 1 Procent basisch phosphorsaurer Magnesia, 7,6 Procent anderer Kalksalze (kohlensaurer Kalk, Chlor- und Fluorcalcium) und 7,4 Procent Alkalisalze. Im Alter nimmt die Gewichtszahl der Salze etwas zu. Compacte und spongiöse Substanz haben annähernd dieselbe Zusammensetzung.

Die Knochen der Säugethiere sind denjenigen des Menschen ähnlich zusammengesetzt; doch enthalten die Knochen des Rindes etwa 4 Procent Kalksalze mehr als die des Menschen. Weit reicher an anorganischen Bestandtheilen sind die Knochen der Vögel; so wurden im Oberschenkelbein der Taube 89 Procent Knochenerde gefunden, wovon 82 Procent aus phosphorsaurem Kalk bestanden. In den Knochen der Amphibien und Fische dagegen ist der Gehalt an Knorpel beträchtlich grösser.

Die Constanz der Zusammensetzung scheint zu der Annahme führen zu müssen, dass die Salze nicht bloss mechanisch in den Knochenknorpel eingelagert, sondern chemisch mit diesem verbunden sind. Hiermit stehen in Widerspruch die Untersuchungen von C. Aeby[1]), sowie die von Maly und Donath[2]), welche für die Unabhängigkeit der Kalksalze von der organischen Grundlage eintreten. Ersterer gelangt auch bezüglich der Zusammensetzung des Phosphates zu etwas anderer Auffassung.

Gleich an dieser Stelle sei bemerkt, in welchem Grade die Gegenwart der Kalksalze die Festigkeit des Knochenknorpels gegenüber einwirkendem Druck und Zug zu steigern vermag. Durch zweiprocentige Salzsäure entkalkte Knochenwürfel von 5 Millimeter Kante (vom Schienbein des Rindes) wurden zerdrückt durch eine Belastung von 68 Kilogramm. Gleichgrosse Würfel von demselben Knochen, die in unverändertem Zustand untersucht wurden, ertrugen dagegen eine Belastung bis zu 426 Kilogramm. Die Gegenwart der Salze steigert die Resistenz des Knochenknorpels gegen Druck demnach etwa um das Sechsfache. Die Entkalkung bringt zwar den Knochenknorpel nicht völlig intact zu Tage, bei der geringen Concentration der Säure aber jedenfalls auch nicht störend verändert. Auch wurde die Säure nach geschehener Entkalkung vollständig aus dem Knorpel ausgewaschen.

---

1) Ueber vergleichende Untersuchungen der Knochen. Centralblatt für die med. W. 1872. — Ueber die Constitution des phosphors. Kalkes der Knochen. Journal f. prakt. Chemie 1872. — Ueber die Beziehungen des Knochenknorpels zum Kalkphosphat. Centralbl. 1873. — Ueber die verschiedene Widerstandsfähigkeit der Knochen im todten und lebenden Zustand. Archiv von Reichert und Du Bois 1874. —

2) Beiträge zur Chemie der Knochen. Wiener Sitzungsberichte Bd. 68. und Journal f. prakt. Chemie. N. F. Bd. 7.

Nun trägt aber ein vorsichtig geglühter, der organischen Substanz entbehrender gleich grosser Würfel desselben Knochens = 149 Kilogramm. Auf Rechnung der gegenseitigen Durchdringung beider Substanzen, ob Einlagerung oder Verbindung, kommt demnach etwa die Hälfte des Werthes der Widerstandskraft des Knochens gegen Druck.

Knochenknorpel zerreisst bei einem Zuge von 1,51 Kilogramm auf den Querschnitt von 1 Quadratmillimeter;

unversehrter Knochen dagegen zerreisst bei einer Zugbelastung von 11,46 Kilogramm auf denselben Querschnitt.

Die Gegenwart der Kalksalze steigert demnach die Widerstandskraft des Knochenknorpels gegen Zug fast um das Achtfache.

2) Wassergehalt.

Von grossem Einfluss auf die Elasticität und Festigkeit der Körper ist deren Wassergehalt. Das frische, menschliche Skelet enthält im reifen Alter 50 Procent Wasser, 15,75 Fett, 12,4 Osseïn und 21,85 Knochenerde (Volkmann)[1].

Die compacte Substanz des frischen menschlichen Oberschenkel- und Schienbeins enthält 12,21 Wasser; dieselben Knochen des Rindes 9,49 Wasser (Aeby)[2]. Frischer lufttrockner Rippenknochen des Pferdes enthielt 14,56 Wasser (Valentin)[3]. In frischen menschlichen Rippenknorpeln, die auf ihre Festigkeit untersucht wurden, fand ich durchschnittlich 67,76 Wasser.

Im Nasenscheidewandknorpel des Kalbes fanden sich 85,87 Procent desselben.

3) Specifisches Gewicht.

Das specifische Gewicht der Knochen mit Beinhaut und Mark wird zu 1,2157 — 1,4554 angegeben; das der völlig gereinigten Knochensubstanz zu 1,8777. Nach Wertheim[4] ist das durchschnittliche specifische Gewicht compacter Substanz menschlicher Knochen = 1,934. Aeby erhielt 1,936. Derselbe für Rinderknochen 2,064.

Ich selbst erhielt von Knochen, die alsdann auf ihre Festigkeit untersucht wurden, folgende, mit den vorgenannten gut übereinstimmende Zahlen, die sich auf frische compacte Substanz des Oberschenkel- und Schienbeins beziehen:

30jähriger Mann	= 1,901
56jährige Frau	= 1,825
Katze	= 2,101
Kalb	= 1,889
Rind	= 2,024
Zahmes Schwein	= 1,965
Wildschwein	= 2,060

1) Untersuchung menschlicher Knochen. Ber. der Sitz. der naturforschenden Ges. zu Halle 1872.

2) Vergleichende Untersuchungen der Knochen. Med. Centralblatt 1872.

3) Lehrbuch der Physiologie des Menschen.

4) Annales de chimie et de physique. T. 21, 1847.

Sp. Gewicht frischer Spongiosa aus dem unteren Ende des menschlichen Oberschenkelbeins
= 1,197
» » eines grösseren frischen Fischwirbels (Wels)
= 1,584
» » eines menschlichen Rippenknorpels
= 1,112

4) Inhalt der Knochenhöhlen.

Die mikroskopische Beschaffenheit der Knochen ist mit Bezug auf ihre Function seltsamer Weise noch nicht beschrieben worden. Sie ist aber, wie sich von vornherein schon denken lässt und wie noch genauer bestimmt werden wird, von tiefgreifender Bedeutung für dieselbe.

Seiner anatomischen Beschaffenheit nach stellt der Knochenknorpel bekanntlich keine gleichartige Masse dar, sondern es findet sich in ihm eine ziemlich regelmässige Vertheilung derjenigen Gebilde, welchen der Knochen seine Entwicklung verdankt, der zwar allseitig, aber in verschiedenem Grade ausläuferreichen, durch die Ausläufer miteinander verbundenen Knochenzellen. Diese bleiben von der Verkalkung frei. Sie liegen darum in Höhlen der verkalkten, von ihnen selbst producirten Grundsubstanz des Knochenknorpels. Dasselbe Verhältniss gilt von den Ausläufern der Zellen; man sagt, sie liegen in »Knochenkanälchen«.

In einem Quadratmillimeter Querschnitt zählte Harting im Mittel 910, Welcker 740 Knochenhöhlen. Da man die Dimensionen der Knochenhöhlen kennt, auch weiss, in welchen Vertikalabständen sie aufeinanderfolgen, so lässt sich das Verhältniss der tragkräftigen zur nichttragkräftigen Substanz annähernd bestimmen. Wird der Raum, welchen das Netzwerk der Knochenkanälchen einnimmt, etwa dem halben Raum der Knochenhöhlen gleichgesetzt, was der Wirklichkeit nahe kommen dürfte, so verhält sich jene zu dieser wie 16 : 1. Dabei ist abgesehen von den Gefässkanälen. Bringt man diese gleichfalls in Abrechnung, und ihre Lumina nehmen einen Raum ein, der in der compacten Substanz etwa $\frac{1}{30}$ ihres Volums beträgt, so ist die tragkräftige Substanz $= \frac{1}{11}$ des ganzen Volums der Compacta.

Für die elastische Kraft des Knochens sind diese Substanzdurchbrechungen offenbar nicht ohne Belang. Hinsichtlich der Cohäsionskraft ist daran zu erinnern, dass gerade der nächste Begrenzungsbezirk der Knochenhöhlen und ihrer Ausläufer chemisch und thermisch wenigstens grosse Resistenz gezeigt hat. Der durch Höhlenbildung bewirkte Gewinn an Umfang fällt bei der Biegung des Knochens günstiger in das Gewicht seiner Leistungsfähigkeit, als ein entsprechend geringerer Umfang bei völlig compacter Masse.

Nach einer Mittheilung von Klebs[1]), die er neuerdings wiederholt, würden die Knochenhöhlen im entwickelten frischen Knochen keine Zellen mehr, sondern Kohlensäuregas enthalten. Ausgenommen hievon sind jene Theile des Knochens, die an Weichtheile stossen. Auch Beale[2]) hält es für wahrscheinlich, dass die Knochenhöhlen Luft führen, die Knochen-

1) Centralblatt f. d. med. W. 1868.
2) Archives of Medecine V.

kanälchen dagegen sollen mit Flüssigkeit gefüllt sein, sich auch unabhängig von den Knochenhöhlen entwickeln.

Wenn man bedenkt, dass trockne Knochen, wie sich zeigen wird, frische feuchte, auch wiederbefeuchtete Knochen an Festigkeit übertreffen, so könnte man in einer Luftfüllung der Knochenhöhlen des lebenden Knochens eine vitale Austrocknung gewissen Grades erkennen wollen, die von dem genannten Erfolg begleitet wäre. Ich habe mich jedoch von diesem Luftgehalt bei darauf gerichteter Untersuchung nicht überzeugen können, muss vielmehr sowohl für frische menschliche wie thierische Knochen eine dauernde Gegenwart kernhaltiger Knochenzellen annehmen. Es gelang dagegen nicht zu sehen, in welcher Weise die Ausläufer der Zellen an den freien Knochenflächen und den Lichtungen der Gefässkanäle endigen.

Von thierischen Knochen wurden geprüft das Schenkelbein der Katze, der Taube, des Salamanders, ein Wirbel vom Wels, in welchem Knochenzellen und Dentinzellen gemischt vorkommen. Sehr gute Bilder von ausläuferhaltigen Knochenzellen geben ausser dem letztgenannten Knochen Flächenschnitte der entkalkten Knochen von Salamandra maculosa. Es gelingt in beiden Fällen leicht, die Zellfortsätze über weitere Strecken zu verfolgen.

5) Knochenlamellen.

Die zellenhaltige Knochensubstanz erfährt eine für die Festigkeit des Knochens besonders wichtige Gliederung dadurch, dass sie zu Lamellen sich zu entwickeln pflegt. Die Dicke der Lamellen schwankt zwischen 0,004 und 0,011 Millimetern (Kölliker). An bestimmten Stellen kommen dieselben in einfacher Schicht vor, in den meisten Fällen ist die Schichtung jedoch eine mehrfache. Sie dienen zur Herstellung theils mehr ebener, theils in verschiedener Weise gebogener Platten und Spangen. Von besonderer Bedeutung ist die Verwendung der gebogenen Platten zu Hohlsäulen von kreisförmigem oder elliptischem Querschnitt, die, Röhrenknochen im Kleinen darstellend, zur Construction der letzteren massenhaft benützt werden. Diese, von den sogenannten Haversischen Lamellensystemen gebildeten Säulen, die man kurz Haversische Säulen nennen kann, laufen überwiegend parallel der Längenaxe des Knochens, ganz entsprechend den Maschen des Gefässnetzes, welches von ihnen beherbergt wird. Die Lichtungen haben einen von 0,009—0,4 und mehr Millimeter schwankenden Durchmesser. Die grösseren Lichtungen treffen im Allgemeinen auf die der Markhöhle näheren Schichten. Die Säulen werden von wenigen bis zu vielen (3—25) concentrisch einander umschliessenden Lamellen gebildet, so dass also die Wandstärke als eine sehr wechselnde erscheint. Die bedeutendste Wandstärke kommt den Lichtungen von mittlerem Durchmesser zu. Nicht immer bilden übrigens alle Lamellen vollständige Ringe, sondern eine mehr oder weniger grosse Zahl der äusseren Lamellen einer Säule kann wie ausgeschnitten endigen, ohne in sich zurückzulaufen. Im Alter nimmt die Lichtung zu, während die Wandstärke sich vermindert.

Ein Querschnitt durch die Mitte des erwachsenen menschlichen Oberschenkelbeins zeigt gegen 3200 Haversische Säulen; ein solcher vom Schienbein deren 2500.

Sie können so dicht stehen, dass sie sich gegenseitig berühren. Damit wäre jedoch für den seitlichen Zusammenhang wenig geleistet. Die äussersten Lamellen haben zwar

selten eine ganz glatte Aussenfläche, vielmehr treten an ihr meist zahlreiche hügelartige Erhabenheiten oder zackige Linien hervor, von welchen jene der Lage der äussersten Knochenzellen entsprechen. Durch das Ineinandergreifen der entsprechenden Erhöhungen und Vertiefungen verstärkt sich der seitliche Zusammenhang.

Stehen die Säulen minder dicht, so greifen die sogenannten Schaltlamellen Platz, die zum grossen Theil parallel der äusseren Knochenfläche verlaufen, theils in verschiedenen Winkeln zu derselben gestellt sind.

Der seitliche Zusammenhang wird aber vor Allem verstärkt durch die zahlreichen hohlen Verbindungsgänge der einzelnen Säulen, welche die Längenaxe derselben in verschiedenen Winkeln kreuzen und wiederum der Form des Gefässnetzes entsprechen. Die Lamellen der Verbindungsgänge zeigen auch hier concentrische Anordnung.

Beschränkter als die Verwendung von Hohlsäulen ist die von Vollsäulen, die alsdann in der Regel stark oblongen Querschnitt besitzen und an Blutgefässe grenzen. Bei jugendlichen Knochen und gewissen Thierknochen gehören sie zu den regelmässigen Vorkommnissen.

Denkt man sich die Gefässräume allmälig an Umfang zunehmend, die Venen erweitert, das Knochenmark Platz gewinnend, so gelangen wir zum Uebergang der Compacta in die Spongiosa.

Das Haversische Säulenbündel der Compacta der Röhrenknochen grenzt nach aussen und nach innen an die sogenannten umfassenden Lamellen, die selbst wiederum Röhren von grossem äusseren und inneren Durchmesser darstellen, in deren Zwischenraum das Haversische Säulenbündel liegt. Die Zahl der Lamellen, welche die Wandstärke des äusseren und inneren Lamellengürtels ausmacht, ist sehr verschieden, nicht allein an verschiedenen Knochen, sondern auch in verschiedenen Höhen eines und desselben Knochens. Nicht minder gross sind die Verschiedenheiten, welche in dieser Beziehung an Knochen verschiedener Thiere vorkommen.

An beiden Seitenflächen des menschlichen Schienbeins gibt es in der Gegend der Mitte seiner Länge Stellen, innerhalb welcher die beiden Gürtelschichten miteinander theils in Berührung treten, theils von nur spärlichen Haversischen Säulen durchsetzt werden. An anderen Stellen desselben Knochens und zwar an der Crista desselben, ist die äussere Gürtelschicht theils sehr dünn, theils wird sie auf ganze Strecken vollständig durchbrochen, so dass die Haversischen Säulen frei zu Tage liegen. Eine vollständige Durchbrechung erleidet der äussere Gürtel übrigens an vielen Orten, an welchen starke Sehnen und Bänder ihren Ursprung nehmen.

Es würde zu weit führen, der entsprechenden Verhältnisse bei den Thieren ausführlicher zu gedenken. Hervorheben möchte ich nur, wie z. B. an den Röhrenknochen des Frosches, die Gürtelschichten überwiegend die Compacta darstellen und völlig in einander übergehen, während die Haversischen Säulen nur sehr spärlich vertreten sind.

An allen Orten, wo Gürtelschichten vorhanden sind, werden sie besonders geeignet und auch genöthigt sein, Biegungsspannungen aufzunehmen und einer Verschiebung und einem Abspringen der Haversischen Säulen zu begegnen.

6) Spongiosa.

Nachdem im Vorausgehenden die Constructions-Elemente des Knochens mit Bezug auf dessen später zu bestimmende Leistung betrachtet worden sind, ist es vor Allem erforderlich, einen Blick zu werfen auf jene schöne Errungenschaft der neueren Osteologie, durch die uns der bisher für regellos gehaltene Verlauf der Spongiosa-Balken als ein sehr geregelter, zugleich aber auch der bedeutungsvolle Sinn dieses Verlaufes klar gestellt worden ist.

So erkennen wir jetzt in der schwammigen Substanz das Typische des Knochenbaues. Die Vergrösserung des Volums, die durch die Auseinanderrückung des Materials der Compacta zur Bildung der Spongiosa gegeben wird, macht nicht bloss die Endstücke geschickt zur Anlagerung grosser sicher führender Gelenkflächen, sondern sie bedingt auch grössere Leistung gegenüber einwirkenden Biegungsgewalten. Die Balken der Spongiosa verlaufen nicht bloss äusserlich geregelt, sondern nach den Linien des maximalen Zuges und Druckes, deren verkörperte Darstellung sie wiedergeben. Die Dura selbst erscheint als zusammengedrängte Spongiosa, bedingt durch lokale Concentration jener Linien. Die Bildung der Markhöhle entspricht der Anwendung derselben Gesetze. Kurz, mit möglichst wenig Aufwand von Material wird die grösste Widerstandskraft erreicht.

Eine Reihe von Schriften, die sich mit dem neugewonnenen Gegenstand beschäftigen, ist im Gefolge der ersten, mit einem Plane der Belastungscurven der unteren Extremität des Menschen ausgestatteten Veröffentlichung durch Hermann Meyer[1]) erschienen.

J. Wolff[2]) bestätigt Meyer's Angaben und gibt schöne photographische Abbildungen vortrefflich ausgeführter Knochenschnitte. Rühmenswerth, selbst wenn er sich geirrt haben sollte, ist sein auf mathematischem Boden stehender Versuch, das Knochenwachsthum allein durch Intussusception zu erklären.

Die Arbeit Zaijer's[3]), die sich mit demselben Gegenstand beschäftigt, behandelt ihn zugleich von vergleichend anatomischer Seite. Ebenso Wolfermann[4]). Er zeigt, dass das Architecturgesetz der Spongiosa nicht bloss an den Knochen der Land-, sondern auch der Wasser-Säugethiere (Seehund) Geltung besitze; auch an den Knochen der Reptilien. Hieran schliesst sich Ch. Aeby's[5]) Versuch, die Knochen hinsichtlich ihrer inneren Structur, die den Belastungsrichtungen entsprechen muss, zu classificiren. Die Spongiosa-Balken verlaufen nach seiner Annahme parallel, wo der Parallelismus der aufeinanderfolgenden Knochenaxen ein bleibender ist; sie convergiren nach den Knochenenden, wo jener Knochenparallelismus eine bleibende oder vorübergehende Störung erfährt.

---

1) Die Architectur der Spongiosa. Archiv v. Reichert und Du Bois-Reymond 1867. — Die Statik und Mechanik des menschlichen Knochengerüstes. W. Engelmann, Leipzig 1873.

2) Ueber die innere Architectur der Knochen. Virchow's Archiv Bd. 50.

3) Architectur der Knochen. Niederländische Zeitschrift für Heilkunde 1871.

4) Beitrag zur Kenntniss der Architectur der Knochen. Archiv v. Reichert und Du Bois-Reymond 1872.

5) Centralblatt f. die med. W. 1873.

Merkel[1]) beschreibt unter der Bezeichnung „Schenkelsporn“ einen soliden Fortsatz der Compacta im Halse des Oberschenkelbeins, der medianwärts vom Trochanter minor liegt und der Stelle der grössten Belastung des Halses bei aufrechter Körperstellung entspricht.

Bardeleben[2]) untersucht die Wirbelsäule des Menschen und mehrerer Thiere auf die Richtung der Spongiosa-Balken. Den senkrecht und horizontal verlaufenden Balken der Wirbelkörper reiht er solche zu, welche schrägen Verlauf haben, und solche, die von den Bogen, vor Allem von den Processus obliqui kommen. Er findet, dass die Wirbelsäule nach dem Schema eines Fachwerks gebaut sei. Insbesondere nimmt er dabei eingehenden Bezug auf die Wirbelsäule der Fische.

Langerhans[3]) behandelt Wirbelsäule und Extremitäten nach derselben Richtung und beschreibt einige neue Balkenzüge. Was die obere Extremität betrifft, so ist nach ihm zu berücksichtigen, dass der Arm zweierlei Belastungen ausgesetzt sein kann, einem Zuge, beim Heben eines Gegenstandes, einem Drucke beim Aufstemmen der Extremität; hiernach glaubt er die Spongiosazüge beurtheilen zu müssen.

Von besonderem Interesse war es, zu erfahren, dass auch in neugebildeter Knochenmasse nach Fracturen u. s. w. ein gesetzmässiger Verlauf der Balken sich herausbildet, wie Koster, Martini, Rabe u. A. gezeigt haben.

Welches nun aber die typische Belastung sei, die der beschriebenen Architectur der Knochen zu Grunde liegt, in welcher Belastung der wichtigste Zweck einer solchen Architectur gesucht werden müsse, diese nach meiner Annahme wichtige Frage ist unter dem Bann der sichtbarsten und auffallendsten Belastungsweise vornehmlich der unteren Extremität des Menschen und sämmtlicher Extremitäten der Landsäugethiere zwar gestellt, aber entweder überhaupt nicht oder unzureichend und irrthümlich beantwortet worden. Ihrer Lösung wird im nächsten Paragraphen gedacht werden.

Zuvor sei noch die Gelegenheit benützt, die Wirkung einer Belastung auf den Knorpel und zunächst den hyalinen Knorpel in das Auge zu fassen. Wie bei dem Knochen die Intercellularsubstanz es ist, die ihm seine Widerstandskraft verleiht, so erscheint auch die Intercellularsubstanz des Knorpels als der widerstandskräftigere Theil seines Gewebes, während den Knorpelzellen vorzugsweise die Bildung und Ernährung desselben zukommt. Doch werden sie die elastischen Eigenschaften des letzteren immerhin mehr zu beeinflussen vermögen als die Knochenzellen die des Knochens, insofern jenes Gewebe weit compressibler ist als dieses.

Gerade diese grössere Weichheit aber lässt eine Ausbildung der Architectur, wie sie im Knochen vorliegt, nur in sehr beschränktem Maasse zu. Wir sehen dem entsprechend die weichere Substanz immer in compacter Masse, undurchbrochen oder selten durchbrochen (s. Schenkelkopf des Frosches) und verhältnissmässig reichlich zur Anwendung gelangen. Diese Anwendungsweise schliesst aber nicht aus, dass die Intercellularsubstanz je nach der

1) Betrachtungen über das Os femoris. Virchow's Archiv Bd. 59.

2) Beiträge zur Anatomie der Wirbelsäule. Jena 1874.

3) Beiträge zur Architectur der Spongiosa. Virchow's Archiv Bd. 64.

Oertlichkeit in verschiedener Menge sich anhäufe und gewisse Richtungen solcher Anhäufungen erkennen lasse.

So finden wir an den Gelenkknorpeln die platten zahlreichen Zellen der Peripherie mit ihren Flächen parallel zur Gelenkoberfläche gelagert; weiter nach innen werden die Zellen rundlich. Erst in grösserer Nähe des Knochens zeigen sich längliche Zellen und Zellenhaufen parallel zur Längsaxe des Knochens gestellt. In den mittleren Schichten fötaler knorpeliger Gelenkköpfe kommen längliche Zellen vor, deren Längsrichtung von anderen Zellen derselben Beschaffenheit auf das deutlichste gekreuzt wird. Auch sternförmige Zellen mit langen, breiten Ausläufern sind hier nicht selten, wie Flachschnitte zeigen.

In den peripherischen Knorpellagen sehen wir demnach senkrecht zur Knochenaxe gestellte Intercellularplatten, die an der freien Oberfläche des Knorpels miteinander communiciren. Weiter nach einwärts folgen scheinbar unregelmässige Netze von Intercellularbalken, die Kreuzungen darbieten können. Schliesslich folgen intercellulare Säulen, wesentlich in Parallelstellung zur Knochenaxe, die durch Quersprossen miteinander verbunden sind. Die gleiche Stellung zeigen jene verkalkten intercellularen Massen, welche den eigentlichen Gelenkknorpel mit dem mehr oder weniger buchtigen und ausgezackten Knochenrande verbinden.

Die Aehnlichkeit, wenigstens der vorletzten und letzteren Anordnungsweise zu querverbundenen Säulen, zu Richtungsstrahlen im fötalen Knorpel, mit den im Knochen vorhandenen, ja bei dessen Entwicklung direct übernommenen Verhältnissen lässt sich wohl nicht verkennen. Die Säulen haben den Druck aufzunehmen, die Quersprossen dem Horizontalschub zu widerstehen. An den freien Gelenkflächen sind es umgekehrt gerade die concentrischen Intercellularplatten, die den Druck aufzunehmen haben. Ein Aehnliches findet statt bei den Querfaserzügen des Faserknorpels beziehungsweise des Bindegewebes, während die parallel zur Druckrichtung gelegenen Längsfaserzüge den aufzunehmenden Druck in absolute Spannung umsetzen.

Ein eigenthümliches Verhalten zeigen die langen Knorpel fötaler Extremitäten vor und bei dem Beginn der Verknöcherung dadurch, dass dichtgedrängte, mit den Flächen quergelegte Knorpelzellenlager den Knorpel in diejenigen Segmente zerlegen, die der späteren Diaphyse und den Epiphysen entsprechen. Am auffallendsten, weil die Segmente nahe zusammengerückt sind, geben diese Erscheinung Längsschnitte durch Hand und Fuss junger Föten. Sie lässt sich zurückführen auf die Festigkeitsverhältnisse des Knorpels, die nicht gestatten, dass langgestreckte, einem schwankenden Druck ausgesetzte Stäbe seiner Substanz ohne Internodien zur Entwicklung gelangen. Unter den nämlichen Gesichtspunkt fällt ohne Zweifel auch die Bildungsmöglichkeit der Gelenke.

Die anschaulichsten Bilder der Vertheilung der Intercellularsubstanz gewinnt man an feinsten Schnitten, bei welchen die Zellen durch Schütteln in Flüssigkeiten entfernt worden sind.

Ueber die Druckwirkung am Knorpel ist übrigens eine Auseinandersetzung von O. Rosenthal[1]) zu vergleichen. —

1) Die Veränderungen des Knorpels vor der Verknöcherung. 1875. Diss. —

Muskelursprünge.

Besitzt schon die Grundgestalt eines Knochens, stamme er vom Menschen oder von irgend einem Wirbelthier mit knöchernem Skelet, kaum jemals die Umrisse eines regelmässigen Körpers, sondern nur mehr oder weniger ausgesprochene Annäherungen an solche, so ist dieselbe überdiess durch gewisse hier schwächer, dort stärker hervortretende Vorwölbungen, Vertiefungen, Durchbohrungen, Biegungen ausgezeichnet. Betrachtet man einen Wirbel, so ist seine mit der embryonalen Entwicklung sich ausbildende Grundgestalt späterhin und insbesondere beim erwachsenen Geschöpfe durch eine Gruppe kräftiger Fortsätze überlagert, die an bestimmtem Ort und bei gewissen Thieren eine solche Ausdehnung erreichen, dass sie dem Ganzen leicht ein fremdartiges Gepräge aufdrücken. Betrachtet man die Extremitätenknochen eines Maulwurfs z. B., so ist deren Grundgestalt in einer Masse von Vorsprüngen und Vertiefungen gleichsam untergegangen.

Nicht alle Ablenkungen der Grundgestalt sind jedoch hier einer speciellen Untersuchung zu unterwerfen, nicht alle ihre Ursachen jetzt zu bestimmen. Eine ausgedehnte Gruppe von Ablenkungen aber, von welchen man so genau wie sie selbst, auch deren Ursachen kennt, ist geeignet den aufmerksamen Blick vor allen anderen zu fesseln. Es ist diess diejenige Gruppe von Hügeln und Höckern, Stacheln, Dornen und Fortsätzen, Leisten und Kämmen und rauhen Linien, von Gruben, Einschnitten, Rinnen und Furchen, welche Muskeln zum Ursprung oder Ansatz dienen oder auch nur zu ihrer Anlagerung. Nicht alle Muskeln, die von Knochen entspringen oder sich an solche ansetzen, nehmen indess bekanntlich von Erhöhungen oder Vertiefungen der Knochenoberfläche Ausgang und Ende; viele entspringen schmal an kleinem Platze oder breit von breiter Fläche und verrathen, zumal die kleineren, am macerirten Knochen kaum oder nicht die früher von ihnen eingenommene Stelle.

Von einer ausführlichen Untersuchung aller Ursprungs- und Ansatzpunkte am menschlichen Skelet kann abgesehen werden; die Mehrzahl der Lehrbücher behandelt sie, wenigstens ihre Aussenfläche, auf das Sorgfältigste. Auch am thierischen Skelet sie weiter zu verfolgen, muss ich mir versagen, so interessanten Vorkommnissen man bei der Durchmusterung zoologischer Museen in dieser Richtung begegnet.

Eine andere Gruppe von Vorsprüngen und Vertiefungen ist sogleich anzuschliessen und zwar diejenige, welche Bändern zum Ursprung oder Ansatz oder zum Verlaufe dient. Die Bänder aber sind zu betrachten als unverknöchert gebliebene Skelettheile. Insofern sie Muskeln zum Ursprung oder Ansatz dienen, ist ein Theil ihres Einflusses auf das knöcherne Skelet auf Rechnung der Muskeln zu übernehmen und also der vorhergehenden Gruppe zuzuweisen.

So gut man diese Verhältnisse kennt, so ist doch der Einfluss weniger bekannt, welchen der Ursprung und Ansatz eines Muskels auf den gröberen und feineren Bau des davon betroffenen Knochengebietes ausüben, sei es bezüglich der Anordnung der Knochenlamellen in der compacten Substanz oder des Balkenwerkes der Spongiosa. Dieser Einfluss ist genauerer Beachtung zu würdigen.

Was das Verhalten der Compacta und Spongiosa an den genannten Stellen betrifft, so machen zum Theil schon die oben angeführten Arbeiten auf Mehreres aufmerksam. So spricht insbesondere Hermann Meyer bei der Erörterung der Curvensysteme des Fersenbeins von dem Einfluss der Achillessehne und führt aus, dass der mittlere Theil der hinteren Plättchen des Streckbandes des Fersenbeins (unterer Horizontalzug) den Zug der Achillessehne unmittelbar aufnehme; das gesonderte kleine System im oberen Theil des Fersenhöckers ist nach ihm dazu bestimmt, den Seitendruck des untersten Theils der Achillessehne aufzunehmen. Das ganze untere System des Fersenbeins scheint ihm eingeschaltet und ein Zwischenglied zwischen Achillessehne einerseits und Ligamentum calcaneo-cuboideum, vielleicht auch calcaneo-naviculare andererseits. Einige Plättchenzüge im Hals des Sprungbeins werden auf den Apparatus ligamentosus tarsi, einige des Hüftbeins auf die Wirkung der Ligamenta vaga bezogen. Er gedenkt der Epicondylen des Oberschenkelbeins und des Trochanter major und hebt von letzterem hervor, dass er entweder rundmaschige Spongiosa enthält oder einige senkrechte, der Oberfläche parallele Plättchen zeigt; die Plättchen des Druckcurvensystems können bis zur Oberfläche des Trochanter reichen. In der Patella finden sich 2 Plättchensysteme von biconvexer Anordnung, die den Zug der Extensorensehne fortzupflanzen im Stande sind. Muskelbäuche und Sehnen vermögen durch ihren Seitendruck die Entwicklung der Knochensubstanz zu hemmen. Die Abknickung des Trochanter major nach hinten denkt er sich als die Folge der Thätigkeit der starken Muskeln, welche von hinten her kommend sich an ihn ansetzen.

Die folgenden Bearbeiter der Spongiosa sind weit entfernt, einen Einfluss der Musculatur in dieser Richtung läugnen zu wollen. Es finden sich vielmehr da und dort zerstreut noch mehrere Beschreibungen und Abbildungen Muskelfortsätze treffender Schnitte. Ich selbst schliesse mich derselben Anschauung an und bedaure nur, dass eine grosse Reihe von Muskelfortsätzen u. s. w. noch nicht untersucht worden ist. Vollständiger noch als es für jetzt möglich ist, würde sich ein gewaltiger Einfluss der Musculatur auf die Beschaffenheit des inneren Baues und selbst der äusseren Grundgestalt der Knochen herausstellen.

Auf ein interessantes Beispiel der Muskelwirkung, welches auch die vorgenannten in Etwas beleuchtet, möchte ich hier nicht unterlassen hinzuweisen; es betrifft die Ansatzstelle des Biceps brachii am Radius, also die Tuberositas radii. Der Einfluss ist so tiefgreifend, dass in dem ganzen Ansatzbezirk und noch etwas darüber hinaus die Compacta fast in ihrer ganzen Dicke davon ergriffen wird, wie Querschnitte zeigen; dass sie sich von

Von anderen Arbeiten, die sich mit der Muskelwirkung auf die Form der Knochen beschäftigen, sind zu nennen:

1) L. Fick, über die Ursachen der Knochenformen, Müller's Archiv 1853. — Neue Untersuchungen über die Ursachen der Knochenformen, 1859. —
2) Kehrer, pelikologische Studien. Beiträge zur vergleichenden und experimentellen Geburtskunde, 1869.
3) Lucas, der Schädel des Maskenschweins und der Einfluss der Muskeln auf dessen Form, 1869.
4) Henke und Reyher, Studien über die Entwicklung der Extremitäten; Wiener Academieberichte Bd. 70; 1874. —

beiden Seiten des Knochens aus in ein starkes gekreuztes Sparrenwerk auflockert, welches an der Unterfläche eines dünnen, gleichfalls besonders construirten Restes der Compacta, dessen Aussenfläche der Tuberositas entspricht, angreift.

Man wird in dieser und ähnlichen Anordnungen, abgesehen von der Ursache, nicht mit Unrecht den günstigen Erfolg sehen können, dass sie die elastischen Kräfte des Knochens bis zu viel tieferen Knochenregionen hervorzurufen und einer Zerreissung des Knochengewebes weit besser vorzubeugen vermögen als rauhe Oberflächen ohne tiefer greifende Aenderung des Gefüges.

Was aber das ursächliche Moment nicht allein der Ausbildung der Muskelfortsätze, sondern der Knochenformen im Ganzen betrifft, so ist zweierlei von einander zu trennen: die Uranlage der Bindesubstanz zu bestimmter, von den übrigen Geweben des Embryo abhängiger Form; und die Weiterbildung eines Theiles derselben zu den Knorpel- und Knochenformen. Nur diese Weiterbildung schon angelegter Substanzmassen kommt hier in Betracht und es ist zweckmässig, an einem möglichst einfachen Beispiel, wie es die Extremitäten an die Hand geben, den Vorgang in das Auge zu fassen.

Die Entwicklung z. B. des Fersenbeins zu der Form, wie sie das Neugeborne und weiterhin die folgenden Wachsthumsstufen zeigen, ist geradezu nicht möglich, wenn die schon in der fötalen Zeit hervortretenden Wirkungen des Gemellus, Soleus und Plantaris nicht durch antagonistische Kräfte, und zwar durch einen Theil der Kraft der Extensorengruppe im Gleichgewicht gehalten werden. Es kommen übrigens als verstärkende Gegenkräfte der Wirkung der Achillessehne auf das Fersenbein nicht minder in Betracht die von der Unterfläche desselben entspringenden Muskeln. Erst unter dem Einfluss dieser grossen und verzweigten Muskelschlinge — zu deren Vervollständigung noch alle bisher nicht genannten Muskeln der Beuge- und Streckseite hinzuzufügen sind, die zum Fuss gelangen — wird sich nicht bloss das Fersenbein, sondern in weiterer Folge das Knorpel- und Knochengerüst mit dem Bandapparat des Fusses in seiner typischen Form entwickeln können. Der Druck dieser Schlinge wird sich aber auch mit demselben Rechte wie jede andere Quelle des Drucks geltend machen auf die Widerstandskraft des umfassten Knorpels und Knochens; denn dem Druck und den Verschiebungen derselben Schlinge hat andererseits das Fussskelet zu allererst wirksam zu begegnen. Ja es lässt sich mit grosser Wahrscheinlichkeit weiterhin vermuthen, dass auch die spätere Architectur des knöchernen Fersenbeins principiell diejenige Balkenstellung zeigen werde, welche sein Platz in der Muskelschlinge erfordert. Versucht man von der Muskelschlinge aus das Skelet des Fusses zu construiren, so geräth nicht bloss das Skelet, sondern auch die Züge der Spongiosa nehmen durchaus den bekannten Charakter an. . Als die normale Belastung des Fusses erschiene alsdann der Druck seiner Muskeln. Die spätere Belastung desselben durch das Gewicht des Körpers schlägt ohnediess keine neue, die vorhergenannte Belastung kreuzende Richtung ein, sondern erscheint nur als Verstärkung der ersten Belastungsweise, als eine Benützung der in der Anlage schon gegebenen Kräfte. —

Denkt man sich umgekehrt die Entwicklung des Fusses vorschreitend, wenn frühzeitig die Wirkung der Flexoren- oder Extensorengruppe ausgeschaltet worden ist. Die

tonische Spannung der fötalen Muskeln erwacht schon ziemlich frühe und ist bei Durchschneidung der Muskeln schon im I. Viertel des Fruchtlebens äusserlich bemerklich, wie ich mich an Hühnerembryonen zu überzeugen Gelegenheit hatte. Von den Eihüllen entblösste Hühnerembryonen zeigen bekanntlich schon am 6. und 7. Tage reflectorische Bewegungen der Extremitäten. Ausschaltungen wie die genannten, müssen eine totale Verkrümmung und Verkümmerung des Fussskeletes zur Folge haben und nicht minder eine Aenderung der Spongiosabildung zu einer entsprechenden Gleichgewichtslage hin.

Während über diesen Gegenstand schon experimentelle Untersuchungen, wenn auch vielleicht nicht ausreichend, vorliegen, ist es ein Anderes, das Ergebniss einer Knochenentwicklung zu betrachten, wenn dieselbe dem Einfluss aller Musculatur entzogen ist. Hierüber denke ich späterhin Mittheilung zu machen.

Ich wende mich vielmehr zu den Wirkungen der thätigen Muskeln auf die Substanz der fertigen Knochen. Der Einfluss einer Muskelspannung auf den Knochen wird sich nicht bloss am Ursprungs- und Ansatzpunkt äussern, sondern sich, ganz abgesehen von der Gelenkbewegung, auf viel weitere Grenzen erstrecken. Nach dem Winkel, welchen die Spannungsrichtung des Muskels mit der Knochenaxe bildet, ist diese Wirkung verschieden geartet. Denkt man sich z. B. die Wirkung des contrahirten Biceps brachii auf die Knochen bei gestrecktem Unterarm. In der ganzen Zwischenstrecke von den Ursprungspunkten zum Ansatz macht sich ein Druck auf die Knochen geltend, der ihrer Längsaxe parallel gerichtet ist. Jenseits der Ursprungs- und des Ansatzpunktes dagegen ist die Knochensubstanz einer Zugwirkung ausgesetzt; dieselbe Wirkung findet an den Ursprungs- und dem Ansatzpunkte selbst statt. Nun kann man sich vorstellen, dass eine gewisse Substanzmenge und eine gewisse Substanz-Anordnung der Armspindel, des Oberarmbeins und des Schulterblattes von der Grösse und Form, die gerade die entsprechende ist zur Widerstandleistung gegen den ausgeübten Druck und Zug, dem Biceps als Knochentheil zukomme, der nicht vorhanden zu sein nöthig hätte, wenn der Biceps selbst nicht vorhanden wäre. Denn es würde ja ausserdem überflüssiges Material an dem genannten Knochencomplex verschwendet sein.

Schaltet man nun den Biceps aus, so müsste man ebenso auch seinen Knochenantheil ausschalten können. Geht man so weiter und führt diesen Versuch für alle Muskeln der Extremität aus, so wird schliesslich nicht einmal mehr die Grundgestalt, viel weniger die Muskelfortsätze übrig bleiben. Entspricht in der That ein gewisses Kraftquantum der Knochen einem gewissen Muskelquantum, und es wird auf diese Frage noch näher eingegangen werden, so ist man berechtigt in dieser Weise vorzugehen. Die Knochen der Extremitäten aber können, wie sich von vornherein behaupten lässt, für nichts anderes bestimmt sein als für die Haut, oder für die Muskeln oder für Beides.

Verwendet man weiterhin in dem soeben benützten Beispiel ausser dem Biceps eine ihm das Gleichgewicht haltende antagonistische Muskelkraft, wie sie der Wirklichkeit entspricht, so liegt der den beiden Muskeln zugehörige widerstandsleistende Knochenstreifen in der Diagonale eines Parallelogramms und stellt die gewissermassen erhärtete, nach der entgegengesetzten Richtung wirkende Mittelkraft zweier Componenten dar, die durch die beiden Muskeln gegeben sind.

Ueberträgt man dieses Verhältniss auf eine ganze Extremität, so ist deren Skelet eine Gruppe von Gegenresultanten antagonistischer Muskelkräfte. Die Vereinigung der in verschiedenen Ebenen liegenden Kraftrichtungen zu einer einzigen solchen Mittelkraft von entgegengesetzter Wirkung ist nur am centralen Abschnitte des Extremitätenskeletes erfolgt, während in der Peripherie desselben zwei und mehr Gegenkräfte derselben Art erhalten geblieben sind. Auch die Axenkrümmungen sind verständlich.

In den Extremitäten liegen nun verhältnissmässig einfache Bildungen vor und können die an denselben gewonnenen Anschauungen nicht sofort auf die Wirbelsäule übertragen werden. Es complicirt sich hier vielmehr der Einfluss der Musculatur mit dem der übrigen Körpersysteme, von welchen insbesondere das Nervensystem bekanntlich eine primitive Bedeutung für die Wirbelgestaltung besitzt.

Nichtsdestoweniger lässt sich die Wirkung der Musculatur auf die Gestalt der Wirbel deutlich genug verfolgen, sei es in späterer Entwickelungszeit, sei es nach Vollendung des Wachsthums. Ja gerade an der knöchernen Wirbelsäule kann der directe Beweis geführt werden, dass die Spannungen der auf sie wirkenden Musculatur von weit grösserer Bedeutung seien für das Gefüge der Wirbel als die Belastung tiefer gelegener Abschnitte der Wirbelsäule durch höher gelegene Rumpfabschnitte, als die Belastung der Wirbelsäule durch das Gewicht des centralen Nervensystems und der Muskeln, durch den Zug der Rumpfeingeweide, mag die Wirbelsäule horizontal gelagert oder aufgerichtet sein.

Schon Wassersäugethiere können nach dieser Seite Verwerthung finden. Am zweifellosesten aber spricht dafür die Beschaffenheit der Wirbel von Knochenfischen. Es ist bei diesen, so lange sie sich im Wasser befinden, das Gewicht irgend welcher Organgruppen auf die Wirbelsäule nur von minimaler Grösse. Auch ist ihre Wirbelsäule nicht wie eine Brücke auf die Pfeiler der Extremitäten gestellt; gleichwohl erkennen wir an der Gestalt der Wirbel sowohl wie an ihrem Bau die Vorkehrungen oder Einwirkungen eines intensiven Druckes.

Man weiss, dass der Wirbelkörper der Knochenfische wesentlich aus zwei knöchernen, mit ihren von der Chorda dorsalis durchbohrten Spitzen gegenseitig verbundenen Hohlkegeln besteht, die zusammen das Extrem eines Röhrenknochens darstellen, während der Säugethierwirbel nur die Spur eines solchen erkennen lässt. Die Grundflächen zweier aufeinander stossender Wirbel sind durch Bandmassen miteinander verkuppelt, die den peripherischen Lagen einer Intervertebralscheibe mit den Längsbändern entsprechen. Untersucht man etwa an dem in photographischer Abbildung wiedergegebenen Schwanzwirbel von Gadus morrhua die weiteren Verhältnisse, so zeigt der Wirbelkörper auf der oberen und unteren Fläche je zwei kräftige, im Wirbelcentrum sich kreuzende Längsbalken, mit welchen die Apophysen des Wirbelkörpers in theilweisem Zusammenhang stehen. Auch auf beiden Seitenflächen ist eine wechselnde Zahl schwächerer Längsbalken vorhanden, wie jene an die Aussenfläche der Kegel angeschmiegt und in sie mündend. Diese Längszüge werden grossentheils rechtwinkelig gekreuzt von feinen Plättchengruppen, die dem Ganzen ein sehr zierliches Ansehen geben und mit den vorhergehenden den Eindruck machen, als sei hier die Spongiosa nach aussen getreten. Sie entsprechen in ihrem Verlauf ganz denjenigen der Säugethiere. Am

vorderen Kegel greifen die Apophysen an, je eine obere setzt sich zu einem Theil, im Bogen auf der Seitenfläche bauchwärts verlaufend, in den Aussentheil einer unteren fort.

Die Bedeutung der Längsbalken kann keinen Augenblick zweifelhaft sein; sie sind dazu bestimmt, einem von vorne nach hinten auf die Wirbelsäule wirkenden Druck entgegenzustreben. Wenn wir nun, wie erörtert, eine im Wesentlichen dem Säugethierwirbel homologe Anordnung der Zug- und Drucklinien in einem Wirbel finden, auf welchen ausser der Belastung durch den Tonus und die willkürliche Contraction der Muskeln überhaupt gar kein anderer Druck in jener Richtung stattfinden kann, so dürfte es erlaubt sein, von hier auf die übrigen Wirbelthierklassen weiter zu schliessen und als typische Belastung auch ihrer Wirbelsäule allein die Spannung ihrer Musculatur, die noch etwa hinzukommenden Belastungen aber als solche secundären Charakters zu betrachten, die ja gewiss Modificationen zu bewirken vermögen werden, nimmer aber primär in Frage kommen.

Dürfen wir aber überhaupt einen äusseren Einfluss als eine die Architectur der Spongiosa bestimmende Kraft betrachten, so wird, wenn schon an der Wirbelsäule deren Musculatur einen Einfluss äusserte, eine Uebertragung dieses Ergebnisses auf die Extremitäten um so eher gestattet sein.

Was die obere Extremität des Menschen betrifft, so fällt diese natürlich unter denselben Gesichtspunkt. Es bedarf nicht der Heranziehung der Schwerkraft, des Hebens von Gewichten u. s. w., um für ihre Architectur einen Grund zu finden [1]).

Betrachtungen der Architectur der Wirbel und ebenso der übrigen Knochen würden demgemäss vor Allem von den Muskelursprungs- und Ansatzpunkten auszugehen haben. Bei den Wirbeln sind die hier wichtigsten Theile die Processus transversi mit den Rippen, die Processus spinosi und die Muskelursprünge an den obliquis. Die Gelenktheile der obliqui selbst aber fallen in eine und dieselbe Reihe mit den synchondralen Wirbelkörperverbindungen. Die Bogensysteme der Processus spinosi und transversi sind uns zum grossen Theile schon bekannt geworden. In der That gibt es kaum ein einfacheres Beispiel für die Demonstration der Belastungscurven als einen Processus spinosus. Wir sehen das Zug- und Druckcurvensystem des eingemauerten Balkens vor uns, an dessen freiem Ende eine Last hängt, d. i. die Spannung seiner Muskeln. Gleiches gilt für die Proc. costarii der Lendenwirbel.

Anders verhält es sich mit den Krümmungen der Wirbelsäule, über welche aus jüngster Zeit mehrere Untersuchungen vorliegen. Die ersten Krümmungen derselben folgen ganz den vorhergehenden des übrigen Embryo und stellen wie die ersten Krümmungen des Embryo selbst eine Art Rankenlinie dar. Von activen Einflüssen der Musculatur ist um jene Zeit noch keine Rede. Mit der vorschreitenden Entwicklung treten insbesondere durch die Massenzunahme der Bauchorgane Modificationen jener Primärkrümmung ein, wie

---

1) Ich bemerke bei dieser Gelegenheit, dass das Skelet der Vögel ganz das gesetzmässige Verhalten der Spongiosa zeige, ebenso das der Amphibien. Das Oberschenkelbein des Frosches z. B. besteht aus einem hohlen Knochencylinder, welcher am oberen Ende durch eine in die Höhle hineinragende und über den Aussenrand hinübergreifende Knorpelkappe gedeckt ist. Einige horizontal liegende Knorpelscheiben, die in gewissen Abständen aufeinanderfolgen und theilweise verkalkt sind, dienen als Streckbänder.

ich in einem vorläufigen Aufsatz[1]) zu zeigen gesucht habe, ohne dass sie den wesentlichen Curvenverlauf ändern.

Eine ganz andere Frage als nach der Ursache der Architectur ist die nach der Ursache der Verknöcherung. Es kann mir nicht einfallen, diese auf Muskelwirkung zurückführen zu wollen. Nur die Bahnen der Knochenbildung folgen den durch den Muskeldruck vorgezeichneten Linien, während die Verknöcherung selbst aus unbekannten Gründen von Statten geht.

Einer Auseinandersetzung bedarf hier noch die feinere Verbindungsweise der Sehnen mit den Knochen. Sie geschieht, wie man weiss, entweder unter Vermittlung des Periostes oder ohne dieselbe.

Im Allgemeinen hängt die Festigkeit der Verbindung der Sehnen mit den Knochen ab, einmal von der Ausdehnung der Ursprungsflächen. Letztere sind nicht bloss nach der Ausdehnung der Grenzen zu beurtheilen; denn die von diesen umschlossene Fläche wird durch Rauhigkeiten oder grössere Erhebungen und Vertiefungen vergrössert. Bei ansehnlichen Verbindungsflächen fällt auch der Luftdruck bemerkenswerth ins Gewicht. Die Festigkeit der Verbindung wird ferner vermehrt durch die Gegenwart zahlreicher Sharpey'scher Fasern; desgleichen durch den Uebergang eines Theiles der Sehne auf die seitlich von der Hauptansatzstelle gelegenen Periosttheile und dadurch unter Umständen bewirkte Schlingenbildung.

Die Lagerung der Knochenschichten kann entweder erhalten bleiben, oder es findet eine Durchbrechung der äusseren umfassenden Lamellen statt, mit Blosslegung der Haversischen Säulen. Dieser Vorgang macht den Eindruck, als wären die umfassenden Lamellen an der betroffenen Stelle in Sehnen- und Bindegewebe übergegangen.

Bleiben die umfassenden Lamellen erhalten, so grenzt sich die äusserste Schicht gegen Bindegewebe oder Sehnen sehr häufig durch eine der Lagerung der äussersten Knochenzellen entsprechende wellig contourirte Oberfläche ab. Werden dagegen die umfassenden Lamellen durchbrochen, so knüpft sich hieran meist eine stärkere Zerklüftung der äusseren Reihen Haversischer Säulen. Sie springen, wie Querschnitte und Längsschnitte zeigen, weit vor oder sind einzeln wie in Gruppen streckenweise ganz aus dem Zusammenhang gerissen. Sie überbrücken in solchen Fällen die zerklüftete Substanz oder ragen frei, nur an einem Ende befestigt, nach aussen. Tiefeindringende Bindegewebsmassen, mit Sehnenbündeln untermischt, hie und da Knorpelzellen zeigend, füllen die Zwischenräume aus.

Die Säulen zeigen hier nicht selten unvollständig geschlossene Lamellen; mehrerenal konnte der directe Uebergang eines Bindegewebsbündels in das Ende einer unvollständigen Lamelle beobachtet werden, die histologische Stellung der Lamellen kennzeichnend.

Die freie Oberfläche der äusseren Lamellen besitzt wieder wellige Form, indem die Knochenkugeln stark vorspringen; sogar vollständig isolirt lagen solche im Bindegewebe.

Die Richtung der Säulen bleibt entweder die normale, oder sie erheben sich nach

---

1) Ueber die Krümmungen der fötalen Wirbelsäule. Sitzungsberichte der naturforschenden Gesellschaft zu Leipzig 1874.

aussen hin, theilen sich mehrmals unter verschiedenen Winkeln und stellen in dieser Weise reichgezackte, noch überdiess klein wellig contourirte Ursprungsfelder der Sehnen dar.

Häufiger als der Uebergang von Bindegewebsbündeln in Knochenlamellen ist das Eindringen von feineren Fibrillenbündeln des Binde- und Sehnengewebes in die Säulen in einer senkrecht oder schief auf die Lamellenfläche gestellten Richtung, in der sie ganze Reihen von Lamellen durchbohren können.

Feinere oder stärkere, weite oder dichte elastische Netze, stärkere gerade gerichtete elastische und Bindegewebsbündel entspringen weiterhin direct und massenhaft von den freien Lamellenflächen.

Von den Blutgefässen der äussersten Säulen, welche die Theilung derselben mitmachen, dringen die wenigsten in das umgebende Binde- und Sehnengewebe, weitaus die meisten bleiben beim Knochen, indem sie innerhalb der äussersten Säulenzacken umbiegen.

Vorstehende Schilderung bezieht sich auf Präparate von der Ansatzstelle des Deltoides, des Iliopsoas, Glutaeus medius, Adductor femoris magnus u. A. Es versteht sich von selbst, dass zur Untersuchung Knochenschliffe weit weniger sich eignen werden, als feine Schnitte entkalkter Knochen oder die betreffenden Sehnen tragender Knochenstücke.

Verhältniss des Knochengewichtes zum Muskelgewicht.

In neuerer Zeit haben sich mehrere sorgfältige Untersuchungen diesem auffallenderweise allzusehr vernachlässigten Gegenstande zugewandt. Aus ihnen geht hervor, dass beim erwachsenen Menschen das Knochengewicht nahe 16, das Muskelgewicht nahe 43% des Körpergewichtes ausmacht. In den verschiedenen Wirbelthierklassen, ja innerhalb einer und derselben Klasse begegnen wir enormen Unterschieden. Da nicht alle Muskeln zur Bewegung von Knochen dienen, nicht alle Knochen der Muskeln wegen vorhanden sind, für meinen Zweck aber die Nothwendigkeit vorlag, das Gewicht nur derjenigen Muskeln zu kennen, welche ausschliesslich einen bestimmten Knochencomplex beherrschen, so führte diess dazu, bloss die Extremitäten in das Bereich zu ziehen, auch von diesen noch den Extremitätengürtel aus practischen Gründen auszuschliessen[1]). An der oberen Extremität sollte vom Oberschenkelbein an das frei gelegte Skelet der Extremitäten gewogen werden, von Muskeln aber alle diejenigen, welche im Stande waren, Druck oder Zug auf die zu wiegenden Skelettheile der Extremitäten auszuüben, alle Muskeln also, die sich an diese Skelettheile ansetzten oder davon entsprangen. Es ist hiermit die Absicht so genau ausgesprochen, dass es unnöthig erscheint, die gewogenen Muskeln noch namentlich zu bezeichnen. Die folgenden Bestimmungen sind durch Herrn Stud. Hugo Salm ausgeführt worden.

1) Wäre z. B. der Beckengürtel mitgerechnet worden, so hätte andererseits ein Theil der Bauch- und Rückenmusculatur, insoweit sie vom Hüftbein entspringt und das Curvensystem desselben beeinflusst, für den vorliegenden Zweck mitgewogen werden müssen.

Gewicht (in Grammen) der Knochen und Muskeln der rechten oberen und rechten unteren Extremität, mit Ausschluss der Extremitätengürtel.

	Obere Extremität			Untere Extremität		
	Muskeln	Knochen	Verhältniss der Muskeln zu den Knochen	Muskeln	Knochen	Verhältniss der Muskeln zu den Knochen
32jähr. kräftiger Mann	3506	736	476 : 100	8404	2214	379 : 100
Neugeborner Knabe	87	26,5	328 : 100	150	58	259 : 100
Hund	192,2	42,8	449 : 100	235,6	53,9	437 : 100
Kaninchen	40,7	8,6	473 : 100	109,2	20,3	538 : 100
Meerschweinchen	11,8	2	590 : 100	22	3,7	595 : 100
Taube	48,1	3,8	1266 : 100	10	2,9	345 : 100
Frosch	3,05	1	305 : 100	13,4	3,1	432 : 100

Das auffallendste Beispiel, wie wenig einem bestimmten Muskelgewicht ein bestimmtes Knochengewicht entspricht, zeigt der Fall der Taube. Worauf aber später noch genauer Rücksicht zu nehmen, ist schon jetzt hervorzuheben, dass nicht allein die Masse die Leistungsfähigkeit eines Knochens bezeichnet, sondern wesentlich seine Form.

Die Muskeln der oberen Extremität des Menschen übertreffen in obigem Fall im relativen Gewicht die der unteren. Uebereinstimmendes Verhältniss ergeben die Zahlen selbst für beide Extremitäten des Neugeborenen, dessen Musculatur im Uebrigen relativ schwächer ist als die des Erwachsenen.

1) E. Bischoff, Einige Gewichts- und Trockenbestimmungen der Organe des menschlichen Körpers. Zeitschrift für rat. Med. Bd. 20. 1863.

2) Volkmann, Mischungsverhältnisse des menschlichen Körpers. Ber. der Sitzungen der naturforschenden Ges. zu Halle 1873.

3) Custor, Ueber die relative Grösse des Darmkanals und der hauptsächlichsten Körpersysteme beim Menschen und bei Wirbelthieren. Archiv v. Reichert und Du Bois-Reymond 1873.

4) G. v. Liebig, Gewichtsbestimmungen der Organe des menschlichen Körpers. Archiv v. Reichert und Du Bois-Reymond 1874.

II. Abschnitt.

Elasticität und Festigkeit der Knochensubstanz.

Vorbemerkungen.

Alle bekannten Körper erleiden durch die Einwirkung äusserer Kräfte gewisse Formveränderungen, die aus Verschiebungen der Moleküle gegeneinander hervorgehen. Diejenige Kraft, mit welcher ein Körper einer Verschiebung seiner kleinsten Theilchen widersteht, nennt man seine Cohäsion. Sie kommt zur Wirkung, wenn eine äussere Kraft eine Verschiebung der kleinsten Theilchen herbeizuführen sucht: ihre Intensität hängt wesentlich ab von der Grösse der Verschiebung und nimmt nach bestimmten Gesetzen mit jener Verschiebung zu oder ab. So klein die einwirkende Kraft auch sein mag, immer entspricht ihr eine gewisse Verschiebung.

Hört die Einwirkung der äusseren Kraft auf, so suchen die Theilchen, da sie einem Widerstand nicht mehr das Gleichgewicht zu halten haben, in ihre ursprüngliche Lage zurückzukehren. Diese Fähigkeit der Körper, eine erlittene Formveränderung nach Entfernung der äusseren Kraft wieder rückgängig zu machen, nennt man Elasticität. Ist der Rückgang ein vollständiger, so nennt man den Körper *vollkommen* elastisch gegenüber der erlittenen Formveränderung; ist der Rückgang unvollständig, bleibt eine dauernde Aenderung seiner ursprünglichen Form zurück, so verhält er sich der erlittenen Formänderung gegenüber unvollkommen elastisch. Streng genommen besitzt vielleicht kein Körper eine wirklich vollkommene Elasticität, so dass *jegliche* Formänderung aus einem *permanenten* und einem vorübergehenden, *elastischen* Theile besteht. Innerhalb einer gewissen Grenze der Formänderung ist jedoch der permanente Theil verschwindend klein gegen den elastischen. Diese Grenze nennt man die *Elasticitätsgrenze* des Körpers in seinem natürlichen Zustand.

Die einer gewissen äusseren Kraft entsprechende vollständige Formveränderung wird nicht plötzlich erreicht; ebensowenig erreicht die nach Entfernung der Kraft eintretende rückgängige Bewegung sofort ihr Ende, sondern erst nach einer Reihe von Schwingungen, die eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen. Derjenige Theil der rückgängigen Bewegung, welcher dem rasch erfolgten Rückgangstheil langsam nachfolgt, wird im Folgenden *elastische Nachwirkung* bezeichnet. Derjenige Rest, welcher zwischen dem Ausgangspunkt der Bewegung und der Grenze der rückgängigen Bewegung bestehen bleibt, ist *Rückstand* genannt.

Die Elasticität eines Körpers wird gross oder klein geheissen, insofern sie grossen oder kleinen Kräften Widerstand zu leisten vermag. Zwischen Grösse und Vollkommenheit der Elasticität besteht kein Zusammenhang. Kautschuk hat kleine, aber sehr vollkommene Elasticität, andere Körper, z. B. Stahl, grosse und vollkommene Elasticität.

Um vergleichbare Werthe zu erhalten, pflegt man die Grösse der Elasticität eines Körpers durch diejenige Spannkraft auszudrücken, welche ein Prisma vom Querschnitt Eins (1 □ Millimeter, oder 1 □ Centimeter u. s. w.) um seine eigene Länge ausdehnen würde, falls diess ohne Ueberschreitung der Elasticitätsgrenze möglich wäre. Diese Spannkraft nennt man Elasticitätscoëfficient oder Elasticitätsmodul.

Untersucht man das Verhältniss zwischen verschiedenen Grössen der auf einen bestimmten Körper wirkenden äusseren Kräfte und den dazu gehörigen Formänderungen, so zeigen verschiedene Körper ein verschiedenes Verhalten und ist die Aufstellung eines allgemein gültigen Gesetzes unmöglich.

Selbst starre unorganische Körper verhalten sich in dieser Beziehung verschieden. Nach Ausdehnungsversuchen an Eisendrähten[1]) wachsen die elastischen Ausdehnungen proportional den Belastungen bis über die Elasticitätsgrenze hinaus. Neuere Untersuchungen (Biegungen) an Kalkspath-Stäbchen[2]) ergaben, dass die Zunahme der Biegungen geringer werde bei grösserem Gewicht und zwar schon in reichlicher Entfernung von der Elasticitätsgrenze. Biegungen an Steinsalz-Stäbchen[3]) lassen eine äusserst geringe Zunahme der elastischen Biegung für dasselbe Gewicht bei wachsender Belastung noch innerhalb der Elasticitätsgrenze erkennen. — Trägt man die Gewichte als Abscissen, die elastischen Ausdehnungen als Ordinaten auf, so ergibt die Verbindung der Ordinatenenden beim Eisen eine gerade Linie, beim Kalkspath und Steinsalz aber eine Curve, von welchen die erstere diesseits, die letztere jenseits der Geraden ihre Bahn fortsetzt. Nur innerhalb einer kleinen, aber nicht nothwendigerweise die Elasticitätsgrenze erreichenden Formveränderung zeigt sich überall Proportionalität zwischen Belastung und Formveränderung.

Was Pflanzen- und Thierstoffe anbelangt, so liegt über dieselben gleichfalls eine Reihe vortrefflicher Untersuchungen vor. Anfänglich hatte es den Anschein, als ob die Elasticitätsverhältnisse der organischen Körper sich specifisch von jenen der unorganischen unterschieden; diese Ansicht hat sich jedoch als irrthümliche herausgestellt. Von grossem Einfluss ist hier der meist bedeutend grosse Wassergehalt. Zur Untersuchung dienten vorzugsweise Kautschuk, frische und trockne Hölzer; Seide, Muskeln, Sehnen, Knochen, Blutgefässe[4]). Da ich später-

---

1) v. Gerstner, Handbuch der Mechanik. Prag 1833.

2) G. Baumgarten, Elasticität von Kalkspathstäbchen. Berlin 1874.

3) W. Voigt, Untersuchungen der Elasticität des Steinsalzes, Leipzig 1875.

4) Wilhelm Weber, Ueber die Elasticität fester Körper, Poggendorff's Annalen Bd. 54.

5) G. Wertheim, Ueber die Elasticität und Festigkeit der hauptsächlichsten Gewebe des menschlichen Körpers. Annales de chimie et de physique T. 24.

6) Ed. Weber, Muskelbewegung. R. Wagner's Handwörterbuch der Physiologie Bd. III.

7) W. Wundt, Die Lehre von der Muskelbewegung. — Die grosse Reihe der noch vorhandenen Arbeiten über Muskelelasticität ist hier nicht aufzuzählen.

8) W. Braune, Beiträge zur Kenntniss der Venenelasticität. Leipzig 1875.

hin diese Verhältnisse noch zu berühren haben werde, so sei hier nur bemerkt, dass im Allgemeinen innerhalb gewisser Grenzen der Formänderung auch bei den organischen Körpern Proportionalität der Formänderung mit der Belastung angenommen werden kann. Jenseits dieser Grenze bewirkt das gleiche Gewicht bei zunehmender Belastung eine geringere Dehnung. Einer neueren Angabe zufolge verläuft die Dehnung des Kautschuks dem Gewicht nicht proportional und nimmt seine Elasticität vom Anfange an gerechnet immer ab bis zu einer gewissen Grenze, um alsdann wieder fast in derselben Weise zuzunehmen.

Wird ein Körper über die im ursprünglichen Zustand ihm zukommende Elasticitätsgrenze hinaus der Einwirkung äusserer Kräfte ausgesetzt, so findet zunächst eine Erweiterung, eine Hinausschiebung der Elasticitätsgrenze statt, während ein Rückstand zur Erscheinung gelangt. Innerhalb der neuen Elasticitätsgrenze, die den Umfang der ihr angehörigen grössten elastischen Biegung besitzt, werden neue Formveränderungen durch die wiederholte Einwirkung derselben, also auch kleinerer Kräfte, ebensowenig hervorgebracht, als durch wiederholte Einwirkung der die Elasticitätsgrenze des natürlichen Zustandes erreichenden Belastung diese letztere Elasticitätsgrenze verschoben werden konnte, vorausgesetzt, dass die Einwirkung durch genügend lange Dauer ihren vollen Werth erreicht hatte. Wirkt eine grössere Kraft ein, so wiederholt sich dasselbe Schauspiel. Schliesslich erfolgt eine Trennung der Theilchen des Körpers. Den Widerstand, welchen ein Körper seiner Zertheilung entgegensetzt, nennt man seine Festigkeit.

Nach der verschiedenen Art der Beanspruchung eines Körpers durch äussere Kräfte unterscheidet man verschiedene Arten der Elasticität und Festigkeit.

Wirkt eine Kraft in der Richtung der Längenaxe eines Körpers durch Zug, so widersteht der Körper durch seine Zug- oder absolute Elasticität und Festigkeit der ihn treffenden Ausdehnung und Zerreissung. Wirkt sie drückend in der Axenrichtung, so dass sie den Körper zusammenpresst und schliesslich zerdrückt oder zermalmt, so hat sie die Druck- oder rückwirkende Elasticität und Festigkeit zu überwinden.

Die übrigen Arten der Elasticität und Festigkeit sind theils Modificationen der genannten Arten, theils Mengungen beider. Als eine solche Mengung erscheint die Biegungs-Elasticität und -Festigkeit. Ein endwärts festgehaltener Balken wird einer Biegung unterworfen, wenn er von einer Kraft ergriffen wird, die senkrecht zu seiner Längenaxe gerichtet ist. Wirkt diese Kraft so nahe dem Unterstützungspunkte des Körpers, dass keine Biegung eintreten kann, so wird der Körper auf seine Schub-Elasticität und -Festigkeit, auf die Festigkeit des Abscheerens, Abschiebens, Abdrückens, wie es bei einem Nietbolzen der Fall ist, in Anspruch genommen. Schliesslich kommt noch in Betracht die Torsions-Elasticität und Festigkeit, welche in Wirksamkeit treten, wenn gewisse Theile eines Körpers genöthigt werden, um eine gemeinschaftliche Axe grössere Winkel zu beschreiben als die übrigen.

Mit dieser Auseinandersetzung verbinde ich die Absicht, im Allgemeinen das Gebiet zu bezeichnen, auf welchem die folgenden Untersuchungen sich zunächst bewegen werden. Ich vermeide es, an dieser Stelle, sei es in populärer oder exacter Form, eine mathematische Entwicklung der Elasticitäts- und Festigkeitsgesetze einfliessen zu lassen, ein Gegenstand,

der schon lange bearbeitet ist und dessen Ergebnisse klar vor uns liegen. Ich werde mich vielmehr der bereits vorhandenen Entwicklungen, wo es nöthig sein wird, bedienen und verweise im Uebrigen auf die Lehrbücher der Mechanik.

Von früheren Untersuchungen über Elasticität und Festigkeit der Knochen ist das Folgende hervorzuheben.

Die ersten Versuche über die Festigkeit der Knochen stellte, soweit bekannt ist, P. van Musschenbroek an. In dem Capitel seines Werkes[1]), welches von dem Zusammenhang und der Festigkeit der Körper handelt, führt er unter der Aufschrift Experimenta in ossibus capta folgende Ergebnisse an, die sich auf absolute Festigkeit beziehen.

Körper	Seite des quadrat. Querschnittes in rh. Zollen	Absol. Festigkeit, in Pfunden
Elfenbein	$\frac{17}{100}$	470
Rinderknochen	$\frac{2}{10}$	210 = 4 $\frac{\text{Kgrmm.}}{\square\text{Mm.}}$
Walrosszahn	$\frac{2}{10}$	163
Rinderhorn	$\frac{2}{10}$	350
Fischbein	$\frac{2}{10}$	300

Ferner beschäftigte sich mit der absoluten Festigkeit der Knochen Bevaw[2]). Sie beträgt nach ihm bei menschlichen Knochen 25,11—50,7 Kilogramm auf den Querschnitt von 1 Quadratmillimeter.

Zu beträchtlich verschiedenem Ergebniss, dessen Maximum nur etwa drei Viertel von Bevaw's Minimum beträgt, gelangte Wertheim[3]), der nicht bloss die absolute Festigkeit, sondern auch die Elasticität der Knochen untersuchte.

Anfänglich, wie er berichtet, hatte er versucht einen ganzen Knochen zur Verlängerung und zur Zerreissung zu bringen und hatte das Wadenbein hierzu gewählt. Es zeigte sich aber bald die Schwierigkeit, einen solchen Knochen passend zu befestigen. Die beiden Condylen lösten sich von der compacten Substanz schon bei einer Belastung von 140 Kilogramm, während die Verlängerung durch dieses Gewicht nur eine sehr kleine war. Das Einspannen in den Schraubstock zersplitterte den Knochen sehr bald. Auch wäre es sehr schwer gewesen, die mittlere Dicke des Knochens zu bestimmen. So nahm er denn möglichst lange Streifen aus demselben Knochen und dem Oberschenkelbein. Die Verlängerungen verhielten sich merklich den Gewichten proportional, besonders bei trocknen Knochen. Bei frischen stieg der Elasticitätscoëfficient ein wenig mit zunehmender Formveränderung; die Verlängerungen nahmen also nicht strenge wie die Belastungen zu, sondern in einem geringeren Grade, doch unbeträchtlich. Der Elasticitätscoëfficient schien im Alter zu steigen, die Festigkeit aber verminderte sich. Austrocknung vermehrte die Festigkeit. Der Elasticitätscoëfficient

---

1) Introductio ad philosophiam naturalem. T. I. Lugd. Bat. 1762.

2) Valentin, Lehrbuch der Physiologie des Menschen. 2. Auflage, Bd. I. S. 34. —

3) Ueber die Elasticität und Festigkeit der vorzüglichsten Gewebe des menschl. Körpers. Annales de chimie et physique 1847.

schwankte zwischen 1819 und 2710 Kilogramm auf das Quadratmillimeter Querschnitt, die absolute Festigkeit zwischen 3,3 und 15,03. —

Den hiermit mitgetheilten historischen Angaben reihe ich nunmehr meine eigenen Untersuchungen über die Elasticität und Festigkeit der Knochen an, welchen einige Werthe derselben Eigenschaften des Knorpels folgen.

Absolute Festigkeit.

Der Apparat, den ich zur Untersuchung der absoluten Festigkeit verwendete, ist demjenigen ähnlich gebaut, welchen Fairbairn[1]) zur Untersuchung der Festigkeit des Eisens construirt hatte; doch sind seine Dimensionen entsprechend der geringeren Festigkeit des Materials schwächer gehalten. Er beruht auf der Benützung eines Hebels zur Ausübung einer beträchtlichen Zugkraft.

Auf zwei senkrechten eisernen Säulen ruht ein horizontalliegender Träger, an welchem das zu untersuchende Knochenstäbchen, dessen Gestalt sogleich beschrieben werden wird, durch eine kurze Kette und Greifvorrichtung aufgehangen wird. Am unteren Ende des Stäbchens greift eine zweite solche Kette an.

Versucht man Stäbchen mit kleinerem Querschnitt, oder Knorpelstäbchen, so bedarf es nur noch der Anfügung einer Wagschale zur Auflegung der Gewichte. Die Wagschale kann auch vermittelst Fussschrauben die Unterlage berühren. Zur Spannung des Stäbchens werden die Schrauben soweit gedreht, bis die Wagschale zu schweben beginnt.

Für grössere Querschnitte ward an Stelle der Wagschale ein einarmiger Hebel gesetzt. Genau 1 Decimeter vom Unterstützungspunkt des mit Eintheilung versehenen Hebels entfernt, wurde der letztere an seiner Unterfläche von der Schneide eines ihn umschliessenden Bügels erfasst, der selbst wiederum an das untere Ende der genannten Kette befestigt worden war. Von dieser Angriffslinie des Bügels an gerechnet war der letzte Theilstrich des Hebels gerade 1 Meter entfernt. Der Hebelarm der Last übertraf also, wenn ein Laufgewicht oder die Wagschale den äussersten Theilstrich des Hebels einnahm, den Hebelarm der Kraft 11mal an Länge. Indessen wurden die entfernteren Theilstriche nur höchst selten und für kleinere Gewichte benützt. Das Gewicht, mit welchem der Hebel durch seine eigene Schwere am Angriffspunkt der Kraft wirksam war, wurde durch eine Wage nahe zu 30 Kilogramm bestimmt und darauf zu 30 Kilogramm gebracht. Dieses Gewicht war also unter allen Umständen dem Ergebniss der Belastung des Hebels hinzuzufügen. Der Querschnitt des Hebels ist ein Rechteck von 36mm. Höhe und 12mm. Breite. Sein Stützpunkt wird durch eine nach abwärts sehende Schneide festgehalten. Die Schneide befindet sich zwischen den breiten, an die Seitenflächen des Hebels eng anschliessenden Armen eines einer Stimmgabel ähnlich geformten Eisenstücks, dessen Fuss in eine wagrechte, auf einem hölzernen Gestelle angebrachte grössere Eisenplatte senkrecht eingelassen ist.

1) Weisbach, Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinenmechanik. Braunschweig 1875.

Das die Ketten mit dem Stäbchen tragende Säulenpaar ruht gleichfalls auf dieser Eisenplatte. Durch eine an der oberen Kette angebrachte Schraube kann vor dem Beginne des Versuchs die vollkommene Horizontalstellung des von dem Bügel der unteren Kette getragenen Hebelarmes herbeigeführt werden.

Die zur Zerreissung bestimmten Knochenstäbchen stammten aus dem Mittelstück der grossen Röhrenknochen des Menschen und verschiedener Säugethiere. Sie waren mit besonderer Rücksicht auf den Umstand hergestellt worden, dass ihre Längenaxe mit der Längenaxe der Knochen möglichst zusammenfiel. Ihre zur Verwendung gelangte Gestalt ist die folgende. An ein Mittelstück von 3 Centimeter Länge schliesst sich jederseits ein verdicktes Ende an. Das Mittelstück ist gebildet durch ein Prisma von rechteckigem Querschnitt, dessen eine Seite in der Regel eine Ausdehnung von 2, die andere von 4 Millimetern besass. Anfänglich hatte ich einen kleineren Querschnitt verwendet, von 2 Millimeter Seite im Quadrat. Die verdickten Enden oder Köpfe gehen in einem Winkel von 135° aus den Mittelstücken hervor. Erst 4 Millimeter jenseits der Anschlusslinien der Köpfe an das Mittelstück nehmen die Flächen der ersteren in der Länge von 1 Centimeter parallelen Verlauf mit den Flächen des Mittelstücks, um alsdann senkrecht abgeschnitten zu endigen.

Die Herstellung der Stäbchen, die ich mir durch einen gewandten Instrumentenmacher besorgen liess, gelang bald sehr zufriedenstellend. Zuerst wurde der betreffende Knochen zu Parallelepipeden vom Querschnitt der Köpfe geschnitten. Die folgende Arbeit hatten gröbere und feine Feilen und Polirplatten zu verrichten. Es war darauf Rücksicht genommen, dass Biegungen bei der Bearbeitung nicht eintreten konnten, ebenso, dass das Einspannen der Stäbchen in hölzerne Kluppen zum Zweck der Feilung keine irgend schädliche Pressungen zu verursachen vermochte. Die Pressung betraf bei dieser Art Stäbchen überdiess bald nur mehr die Köpfe.

Ein Metallstreifen, in welchen an verschiedener Stelle die beiden angegebenen Dimensionen des Querschnitts genau ausgeschnitten waren, diente durch Einpassungsversuche mit den Stäbchen als erster Maassstab für die Einhaltung der richtigen Gestalt. Bei mikrometrischen Messungen stellten sich die Schwankungen als so unbedeutend heraus, dass sie hier vernachlässigt werden konnten.

Eine gewisse Schwierigkeit ergab sich, als es sich darum handelte, von frischen, feuchten Knochen zu gewinnende Stäbchen unverändert zum Versuch zu bringen. Die Austrocknung des blossgelegten und angesägten Knochens geschieht so rasch, dass die Stäbchen schon während der Bearbeitung verändert worden wären, wenn man sie nicht befeuchtet hätte. Es verging nun aber immer eine Reihe von Stunden, bis dieselben zum Versuch gelangen konnten. Sie wurden bis dahin aus diesem Grunde sofort in Brunnenwasser, seltener in Fruchtwasser, oder auch zwischen frische Hautstücke eingelegt.

Waren endlich die Stäbchen soweit hergestellt, so diente zu ihrer Befestigung an die Ketten folgende Vorrichtung. Zwei Stahlplatten wurden in gleicher Weise derart ausgeschnitten, dass die Form des Ausschnittes beim Einschieben der Stäbchen genau auf die Anschlussflächen der Köpfe passte. Jede Stahlplatte, die einen Kopf des Stäbchens auf-

genommen hatte, ward nun von einer Klammer ergriffen, die an dem freien Ende beider Ketten angebracht war.

Hatte ein Stäbchen seinen Platz zwischen den Ketten eingenommen, so blieb nur noch übrig, den Befestigungspunkt der obern Kette durch Verschiebung des Trägers senkrecht auf die Angriffsebene des Hebels zu stellen und diesem eine völlig horizontale Lage zu geben. Darauf konnte die Streckung des Stäbchens vorgenommen werden. Dem der Zerreissung desselben folgenden Falle des Hebels wurde durch eine seinem vorderen Ende genäherte Unterlage begegnet.

Von einer Messung der Ausdehnungen dieser oder längerer Stäbchen war vorläufig von vornherein abgesehen worden. Es sollte nämlich zuerst die Ausdehnung vermittelst der Biegung bestimmt und je nach Umständen alsdann zu directen Ausdehnungsversuchen übergegangen werden. Die Elasticität des Knorpels, der für Biegungsversuche sich wenig eignet, wurde dagegen durch Zug in der Axenrichtung bestimmt und die Verlängerungen durch einen später zu beschreibenden Fühlhebel gemessen.

Das Gewicht der an dem Stäbchen hängenden unteren Stahlplatte und Kette sowie des Bügels betrug 110 Gramm.

Die Belastungen des Hebels geschahen möglichst vorsichtig und in der Nähe des Zerreissungsgewichtes nur langsam steigend. In der Regel wirkte eine Belastung 5 Minuten lang, bevor eine Verstärkung derselben stattfand.

Die Zerreissung erfolgte in den meisten Fällen plötzlich, ohne Vorläufer, mit heftigem knallartigem Schlage. Hie und da ging ein Knistern voraus, auf welches meist sehr bald die völlige Zerreissung eintrat.

Die Dauer der Belastung übte einen unverkennbaren Einfluss aus auf die Grösse der Festigkeit. Belastungen, die den mittleren Zerreissungswerth erreicht hatten, vermochten nach mehrstündiger Einwirkung die Zerreissung herbeizuführen, die bei gewöhnlichem Verfahren also erst durch einen höheren Werth herbeigeführt worden sein würde. Diess geht so weit, dass dreitägige Einwirkung etwa $^2/_3$ der mittleren Belastung bedarf, um die Zerreissung zu bewerkstelligen.

Die Rissstelle lag an keinem gleichen, bestimmten Ort. Die Rissfläche zeigte sich muschelig oder zackig, einem kleinen Krystallfelde ähnlich; sie lag theils mehr quer zur Längenaxe, theils, aber seltner, stärker schief zu derselben. Absplitterungen kleiner Theilchen konnten häufig bemerkt werden. Zum Oeftern zerriss sonderbarer Weise das Stäbchen in drei grössere Stücke, ohne dass ein Zusammenhang mit der Grösse der Belastung zu finden war. Es bleibt nichts übrig als anzunehmen, dass zwei gleich schwache Stellen in solchen Stäbchen lagen, die alsdann auch zugleich zerreissen mussten.

Frische, feuchte Stäbchen wurden kurz vor dem Versuche durch Erwärmung des Wassers auf 38° C. gebracht und während der Versuchszeit durch fortlaufende Beträuflung auf dieser Temperatur erhalten, um den natürlichen Zustand soweit als möglich zu erreichen.

Bei den Versuchen mit trocknen Stäbchen betrug die umgebende Temperatur zwischen 15 und 25° C.

Es folgt nunmehr die Zusammenstellung der gemachten Versuche. Sämmtliche Reihen beziehen sich auf Stäbchen mit rechteckigem Querschnitt von 2 und 4 Millimeter Seite. Der angegebene Belastungswerth ist nicht der des Hebelarms, sondern der von den Stäbchen erlittene.

Versuche mit Knochenstäbchen.

1) Oberschenkelbein eines 70jährigen Mannes.
6 Versuche an frischen erwärmten Stäbchen. Die Zerreissung erfolgte bei den verschiedenen Stäbchen durch die Belastung mit
71 60 55 62,5 71,5 52 Kilogramm.
Durchschnittsbelastung . . . . . 62 »
Reduction derselben auf 1□ Mm. Querschnitt . . . . 7,75 »

2) Oberschenkelbein einer 56jährigen Frau.
5 Versuche an frischen erwärmten Stäbchen. Die Zerreissung erfolgte durch die Belastung mit
46 52,5 56 53,5 46 Kilogramm.
Durchschnittsbelastung . . . . . 50,8 »
Reduction auf 1□ Mm. Querschnitt. . . . . 6,35 »

3) Oberarmbein eines 28jährigen Mannes.
5 Versuche an frischen erwärmten Stäbchen. Die Zerreissung erfolgte durch die Belastung mit
80 80 75 50 85 Kilogramm.
Durchschnittsbelastung. . . . . 74 »
Reduction auf 1□ Mm. Querschnitt . . . 9,25 »

4) Oberschenkelbein desselben Mannes.
a) 7 Versuche an frischen erwärmten Stäbchen. Die Zerreissung erfolgte durch die Belastung mit
71 90 82,5 80 82,5 92 76 Kilogramm.
Durchschnittsbelastung. . . . . 82 »
Reduction auf 1□ Mm. Querschnitt . . . . . 10,25 »
b) 6 Versuche an trocknen Stäbchen. Die Zerreissung erfolgte durch die Belastung mit
90 105 80 102,5 96 82,5 Kilogramm.
Durchschnittsbelastung . . . . . 92,67 »
Reduction auf 1□ Mm. Querschnitt . . . . . 11,58 »

5) Oberarmbein eines 30jährigen Mannes.
6 Versuche an frischen erwärmten Stäbchen. Die Zerreissung erfolgte durch die Belastung mit
105 80 77,5 80 105 84 Kilogramm.
Durchschnittsbelastung . . . . . 88,58 »
Reduction auf 1□ Mm. Querschnitt . . . . . 11,07 »

6) Oberschenkelbein desselben Mannes.
6 Versuche an frischen erwärmten Stäbchen. Die Zerreissung erfolgte durch die Belastung mit
106 90 86 82,5 90 81 Kilogramm.
Durchschnittsbelastung . . . . . 89,25 »
Reduction auf 1□ Mm. Querschnitt . . . . . 11,16 »

7) Schienbein desselben Mannes.

8 Versuche an frischen erwärmten Stäbchen. Die Zerreissung erfolgte durch die Belastung mit

90 105 90 85 136 113 90 85 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung . . . . . 99,25 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt . . . . . 12,41 »

8) Schienbein vom Rinde.

a) 7 Versuche an frischen erwärmten Stäbchen. Die Zerreissung erfolgte durch die Belastung mit

120 90 106 80 82,5 82,5 81 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung . . . . . 91,71 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt . . . . . 11,46 »

b) 6 Versuche an trocknen Stäbchen. Die Zerreissung erfolgte durch die Belastung mit

115 51 135 124 85 87 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung. . . . . 99,5 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt . . . . . 12,43 »

9) Schienbein eines Kalbes.

5 Versuche an frischen erwärmten Stäbchen. Die Zerreissung erfolgte durch die Belastung mit

48 74 101 70 64 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung . . . . . 71,4 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt . . . 8,93 »

Von Säugethierknochen gelangten noch zur Untersuchung das Schienbein des Haus- und des Wildschweins. Die Festigkeit der Compacta des ersteren betrug 7,3, die des letzteren 10,29 Kilogramm auf den □ Mm. Querschnitt.

Versuche mit Knorpelstäbchen.

1) Knochenknorpel vom Rinde. Die Stäbchen wurden erhalten durch Entkalkung der fertigen Knochenstäbchen mit verdünnter Salzsäure. Die Zerreissung erfolgte bei 6 Versuchen durch die Belastung mit

8,8 12,2 17,7 9,8 12 12,2 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung. . . . . 12,1 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt . . . . . 1,51 »

2) Rippenknorpel vom Menschen. Quadratischer Querschnitt von 4 Mm. Seite. Die Zerreissung erfolgte bei 5 Versuchen durch die Belastung mit

1,9 3,2 2,3 3,7 2,5 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung . . . . . 2,72 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt . . . . 0,17 »

Dehnungsversuche mit Knorpelstäbchen wurden wiederholt angestellt. Von mehreren ähnlich verlaufenden Fällen soll für den Knochen- und Rippenknorpel hier nur je ein Beispiel angeführt werden; für den Knochenknorpel mit besonderer Rücksicht auf Ausdehnungs- und Biegungsversuche am Knochen.

Ausführlichere Angaben über diesen Gegenstand sollen bei anderer Gelegenheit, zugleich mit den Ergebnissen einer Untersuchung der Druck-Elasticität des Knorpels gegeben werden. Die anzuführenden Beispiele des Verlaufs der Dehnungs-Elasticität sind die folgenden:

Dehnung des Knochen- und Rippenknorpels.

Die Verlängerungen sind durch einen Fühlhebel gemessen und 20mal vergrössert in Millimetern angegeben, die Belastungen in Grammen. Methode abwechselnder Belastung und Entlastung, siehe Capitel Biegung. Die Colonne Elastischer Dehnungszuwachs gibt an, um wie viel je eine Belastungsvermehrung die Stäbchenlänge steigerte.

Knochenknorpel vom Rinde.

Rechteckiger Querschnitt von 2 u. 4 Mm. Seite, Länge 70 Mm.

Belastung	El. Dehnungszuwachs für 200 Gramm
200	9
400	9
600	8
bis 1200 für je 200 Gr.	8
1400	7
1600	6
1800	5
2000	4
2200	3
2400	3
2600	2
2800	1,5
3000	1,5
3200	1
bis 3800 » »	1
4000	0,5
bis 12000 » »	0,5

12200 rasche Verlängerung und Zerreissung.

Elasticitätsmodul [1] $= 3{,}888 \frac{\text{Kgr.}}{\square\text{Mm.}}$

Rippenknorpel vom Menschen.

□ Querschnitt von 4 Mm. Seite.
Länge 70 Mm.

Belastung	El. Dehnungszuwachs
200	20
400	20
600	19
800	18
1000	18
1200	16
1400	16
1600	15
1800	14
2000	14
2200	14

2300 rasche Verlängerung und Zerreissung.

Elasticitätsmodul $= 0{,}875$

Rückwirkende Festigkeit.

Der gebrauchte Apparat ist der zur Bestimmung der absoluten Festigkeit verwendete und bereits beschriebene Hebel.

Um ihn zur Messung von Druck geeignet zu machen, war es nur nöthig, auf die horizontale Eisenplatte, die in der Gegend ihres hinteren Endes den Bolzen zur Aufnahme des Stützpunktes des Hebels trägt, in passender Entfernung vom Bolzen eine genügend hohe und dicke eiserne Säule anzubringen, die dem auf seine rückwirkende Festigkeit zu unter-

1) Sind lbh die Dimensionen des Stäbchens, P die Mehrbelastung, λ die von ihr hervorgebrachte elastische Verlängerung, so ist der Elasticitätsmodul

$$E = \frac{l}{\lambda} \cdot \frac{P}{bh}.$$

suchenden Körper als Unterlage dienen sollte. Es handelte sich weiterhin noch darum, den Druck des Hebels nur von einem Punkte oder einer Querlinie aus auf das Untersuchungsobject zu übertragen. Diess wurde bewerkstelligt durch einen Stahlkeil von 1 □ Centimeter Grundfläche und 0,5 Centimeter Höhe. Die Schneide des Keils kam auf dieselbe Linie des Hebels zu liegen, die früher den Bügel der Kette aufzunehmen gehabt hatte, d. i. genau 1 Decimeter vom Stützpunkt des Hebels entfernt. Die Einschaltung verschieden hoher Metallplättchen zwischen Object und Säule ward benützt zu vollkommner Horizontalstellung des Hebels.

Als Untersuchungsobject dienten Würfel, die aus der compacten oder spongiösen Substanz mehrerer Knochen des Menschen und verschiedener Säugethiere geschnitten worden waren. Die Herstellung der Würfel geschah in der Weise, dass zuerst Parallelepipede von quadratischem Querschnitt vollkommen vollendet, und aus diesen hierauf durch Quertheilung Würfelreihen gebildet wurden. Zur Vollendung der Parallelepipede, die so aus dem Knochen geschnitten waren, dass ihre Längenaxe mit der des Knochens zusammenfiel, erwies sich am Nützlichsten, sie zu dem gewünschten Querschnitt auf einer grossen ebenen Glasplatte mit feinstem Smirgel feucht abzuschleifen. Quadratischer Querschnitt und Parallelität der Flächen konnten leicht erhalten werden dadurch, dass die abzuschleifenden Stäbchen zwischen 2 genau gearbeitete stählerne Parallelepipede von rechteckigem Querschnitt (dessen Breite 1 Centimeter, dessen Höhe etwas geringer war als die Querschnittsseite des abzuschleifenden Stäbchens, aber gerade dessen zu erzielende Dimension besass) vorsichtig eingeklemmt und zu der Höhendimension derselben auf beiden Seiten abgeschliffen wurden; ganz ebenso gelangten hierauf die beiden übrigen Seitenflächen zur Abschleifung, nach Drehung des Stäbchens um 90°.

Ausser Würfeln gelangten auch Parallelepipede, die den Würfel mehrmals und vielmals an Höhe übertrafen, zur Prüfung auf ihre Festigkeit, ebenso ganze Röhrenknochen und Theile derselben. Die hierüber erhaltenen Ergebnisse werden erst bei Erörterung der Strebfestigkeit ihren Platz finden.

Da die Widerstandskraft der Knochenwürfel nicht bloss nach einer Axenrichtung, sondern nach drei Richtungen bestimmt werden sollte, so war bei der Zertheilung der Parallelepipede darauf Rücksicht genommen worden, durch eine Marke an passendem Ort die Lage der drei Axen an den verschiedenen Würfeln zu fixiren.

Die Zerdrückung nach beiden Horizontalaxen lieferte öfter, wenn eine völlige Zermalmung verhindert war, sehr schön isolirte Stücke Haversischer Säulen von ansehnlicher Länge.

Die verschiedenen Würfel gelangten zum Theil im frischen, feuchten, erwärmten Zustand, zum Theil getrocknet zur Zerdrückung. Auch die trocknen Würfel stammten nicht von macerirten oder früher in Spiritus gelegenen, sondern von frischen Knochen, an welchen noch keine Vorkehrungen gegen die bis zur Verwendung fortgeschrittene Austrocknung getroffen oder die absichtlich getrocknet worden waren.

Den mitzutheilenden Versuchsreihen ist eine Zusammenstellung der Durchschnittswerthe absoluter und rückwirkender Festigkeit, sowie eine vergleichende Tabelle der Festigkeit anderer Körper angereiht.

Würfel compacter Substanz.

Von Versuchsreihe 1—9 ist die Druckrichtung eine der Längenaxe des Knochens, aus welchem die Würfel stammen, parallele.

1) Oberschenkelbein eines 70jährigen Mannes (s. Absol. Festigkeit Versuch 1).
5 Versuche an frischen erwärmten Würfeln von 4 Mm. Kante. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit
265 195 230 182 185 Kilogramm.
Durchschnittsbelastung . . . . . 211,4 »
Reduction auf 1□·Mm. Querschnitt . . . . . 13,21 »

2) Oberschenkelbein einer 56jährigen Frau (Abs. F. Vers. 2)
5 Versuche an frischen erwärmten Würfeln von 3 Mm. Kante. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit
130 120 112 112 114 Kilogramm.
Durchschnittsbelastung . . . . . 117,6 »
Reduction auf 1□ Mm. Querschnitt . . . . . 13,07 »

3) Oberarmbein eines 28jährigen Mannes (Abs. F. Vers. 3).
6 Versuche an frischen erwärmten Würfeln von 4 Mm. Kante. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit
190 195 205 195 212 185 Kilogramm.
Durchschnittsbelastung . . . . . 197 »
Reduction auf 1□ Mm. Querschnitt . . . . . 12,56 »

4) Oberschenkelbein desselben Mannes.
a) 7 Versuche an frischen erwärmten Würfeln von 4 Mm. Kante. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit
240 196 242 246 280 198 212 Kilogramm.
Durchschnittsbelastung . . . . . 230,6 »
Reduction auf 1□ Mm. Querschnitt. . . . . 14,41 »

b) 7 Versuche an trocknen Würfeln von 4 Mm. Kante. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit
240 305 290 336 315 296 305 Kilogramm.
Durchschnittsbelastung . . . . . 298,1 »
Reduction auf 1□ Mm. Querschnitt. . . . . 18,63 »

5) Oberarmbein eines 30jährigen Mannes (Abs. F. Vers. 5).
7 Versuche an frischen erwärmten Würfeln von 4 Mm. Kante. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit
268 225 230 230 340 235 230 Kilogramm.
Durchschnittsbelastung . . . . . 246,86 »
Reduction auf 1□ Mm. Querschnitt. . . . . 15,43 »

6) Oberschenkelbein desselben Mannes.
5 Versuche an frischen erwärmten Würfeln von 4 Mm. Seite. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit
255 260 232 233 260 Kilogramm
Durchschnittsbelastung . . . . . 248 »
Reduction auf 1□ Mm. Querschnitt . . . . . 15,5 »

7) Schienbein desselben Mannes.

7 Versuche an frischen erwärmten Würfeln von 4 Mm. Kante. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit

260 250 284 272 284 264 268 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung . . . . . 268,86 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt. . . . . 16,8 »

8) Oberschenkelbein eines 33jährigen Mannes.

6 Versuche an frischen erwärmten Würfeln von 3 Mm. Kante. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit

135 145 155 160 142 165 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung . . . . . 150 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt . . . . . 16,6 »

9) Oberschenkelbein eines etwa 40jährigen Mannes. Diese und die folgenden Versuchsreihen sind aus einer bereits veröffentlichten, mehrere Individuen betreffenden Zusammenstellung ausgehoben und betreffen ein und dasselbe Individuum.

a) Druckrichtung parallel zur Längenaxe des Knochens.

5 Versuche an aufgetrockneten Würfeln von 5 Mm. Kante. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit

435 580 475 525 420 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung. . . . . 487 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt . . . . . 19,48 »

b) Druckrichtung senkrecht zur Längenaxe. Die Ergebnisse für beide Horizontalaxen zeigten keine Abweichungen unter sich und sind nicht getrennt aufgeführt.

6 Versuche an aufgetrockneten Würfeln von 5 Mm. Kante. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit

440 460 450 416 454 450 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung. . . . . 445 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt . . . . . 17.8 »

10) Schienbein desselben Mannes.

a) Druckrichtung parallel der Längenaxe.

5 Versuche an aufgetrockneten Würfeln von 5 Mm. Kante. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit

435 430 430 415 445 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung. . . . . 431 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt . . . . . 17,24 »

b) Druckrichtung senkrecht zur Längenaxe.

5 Versuche an aufgetrockneten Würfeln von 5 Mm. Kante. Die Zerdrückung erfolgte durch eine Belastung mit

305 290 330 345 305 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung. . . . . 315 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt . . . . . 12,6 »

11) Oberarmbein desselben Mannes.

a) Druckrichtung parallel der Längenaxe.

5 Versuche an aufgetrockneten Würfeln von 4 Mm. Kante. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit

218 218 221 210 225 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung. . . . . 218,4 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt . . . . . 13.65 »

b) Druckrichtung senkrecht zur Längenaxe.

6 Versuche an Würfeln von 4 Mm. Kante. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit

204 184 166 190 188 160 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung . . . . . 182 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt . . . . . 11,3 »

12) Schienbein des Rindes.

a) 5 Versuche an frischen erwärmten Würfeln von 4 Mm. Kante. Druckrichtung parallel zur Längenaxe. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit

210 195 220 225 215 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung. . . . . 213 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt . . . . . 13,31 »

b) 5 Versuche an trocknen Würfeln von 4 Mm. Kante. Druckrichtung parallel zur Längenaxe. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit

195 267 284 226 265 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung. . . . . 247,4 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt . . . . . 15,46 »

13) Schienbein des Kalbes.

4 Versuche an frischen erwärmten Würfeln von 4 Mm. Kante. Druckrichtung parallel zur Längenaxe. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit

175 185 215 210 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung. . . . . 196,25 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt 12,26 »

14) Würfel vom Schienbein des Hausschweins wurden zerdrückt durch eine Belastung von 11,73, des Wildschweins durch eine Belastung von 14,71 Kilogramm auf 1 □ Mm. Querschnitt.

Würfel spongiöser Substanz.

15) Lendenwirbel des erwachsenen Menschen.

Druckrichtung parallel der Längenaxe.

4 Versuche an frischen Würfeln von 10 Mm. Kante, aus dem Inneren des Wirbelkörpers. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit

87,5 65 95,5 87 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung . . . . . 83,75 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt 0,8375 »

16) Condylen des erwachsenen menschlichen Oberschenkelbeins.

Druckrichtung parallel der Längenaxe.

4 Versuche an frischen Würfeln von 10 Mm. Kante, aus der inneren Substanz der Condylen. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit

90 120 95 80 Kilogramm

Durchschnittsbelastung . . . . . 96,25 »

Reduction auf 1 □ Mm. Querschnitt . . 0,9625 »

Calcinirte und entkalkte Würfel.

17) Schienbein des Rindes.

a) Aus der compacten Substanz geschnittene Würfel von 5 Mm. Kante wurden zerdrückt mit einer durchschnittlichen Belastung von . . . . . 426 Kilogramm.

b) Würfel derselben Art, nachdem sie vorsichtig calcinirt worden waren, mit 149 »

c) Würfel derselben Art, nach Entkalkung durch 2proc. Salzsäure, mit. . 68 »

Menschlicher Rippenknorpel.

1) 5 Versuche an frischen erwärmten Würfeln von 5 Mm. Kante. Sie wurden zerdrückt bei einer Belastung mit

34 34 38 36 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung . . . . . 35,5 »

Reduction auf 1□ Mm. Querschnitt . . 1,45 »

2) 5 Versuche an frischen erwärmten Würfeln von 5 Mm. Kante, von Rippenknorpeln eines andern Individuum. Die Zerdrückung erfolgte durch die Belastung mit

37,25 40 37,5 42,5 39 Kilogramm.

Durchschnittsbelastung. . . . . 39,3 »

Reduction auf 1□ Mm. Querschnitt . . . . . 1,57 »

Rückblick.

Es kann fraglich erscheinen, ob die für die Spongiosa angegebenen Zahlen einen verwerthbaren Ausdruck für die Widerstandsfähigkeit derselben gegen Druck auch in irgend einer andern Region des Körpers darstellen. Da in der That die Spongiosa ein in Stärke, dichter Stellung und Richtung der sie zusammensetzenden Balken äusserst wandelbares Gebilde ist und Uebergänge besitzt vom feinsten Netzwerk bis zum Gefüge der Compacta, so kann man allerdings behaupten, dass ihre Festigkeitsgrenzen von Null bis zum vollen Werth der Compacta auseinanderliegen müssen. Indessen gibt es doch auch viele spongiösen Strecken mit einem gewissen mittleren Gefüge und für letztere nur oder schliesslich bloss für die untersuchten Stellen sollen die Zahlen einen ungefähren Massstab der Widerstandsfähigkeit geben.

Die Compacta selbst kann von vornherein nicht als ein über ihre ganze Ausdehnung hin gleich widerstandsfähiges Gebilde angesehen werden: diess ist schon durch ihr inneres Verhältniss zur Spongiosa begründet. Die beigebrachten Zahlen bestätigen eine solche Annahme. Die Compacta verschiedener Knochen sowohl als auch verschiedener Bezirke eines und desselben Knochens zeigt Festigkeitsziffern, deren Differenzen sich nicht durch unvermeidliche Fehlerquellen erklären lassen, sondern nur durch Berücksichtigung der wechselnden und ungleichmässigen Structurverhältnisse. Diess gilt sowohl für Oberflächenbezirke als auch für den Querschnitt. Was letzteren ausserdem betrifft, so kann ich nach meinen Erfahrungen nicht behaupten, dass die peripherischen Bezirke des Querschnitts durchgängig oder auch nur in der Regel die inneren Rindenbezirke an Widerstandsfähigkeit übertreffen.

Die rückwirkende Festigkeit übertrifft die absolute, wie die folgende Zusammenstellung zeigt, nicht unbeträchtlich, insbesondere im vorgerückteren Alter. Im mittleren Alter, am frischen Knochen, verhält sich nach den verschiedenen Versuchsreihen die rückwirkende zur absoluten wie 14,41 : 10,25

wie 12,56 : 9,25

wie 16,8 : 12,41

wie 15,43 : 11,07

Im vorgerückten Alter nimmt die absolute Festigkeit mehr ab als die rückwirkende. Im Zustand der natürlichen Feuchtigkeit und Wärme ist der Knochen minder fest als im trocknen, erkalteten. Von jenen beiden Einflüssen wirkt jeder für sich festigkeitsvermindernd, wie bei den Biegungsversuchen sich ergeben wird.

Einer besonderen Erwähnung verdient der Einfluss der Druckrichtung auf die Festigkeit, indem die zur Längenaxe parallele Druckrichtung die grösseren Werthe erzielt. Da dieses Verhältniss nicht durch die Knochensubstanz an sich, sondern durch die histologische Form ihrer Verwendung hergestellt wird, so ergibt sich zugleich ein directer Zusammenhang zwischen mechanischer Leistung und histologischer Structur.

Der Knochenknorpel übertrifft, zum Theil aus denselben Gründen, den hyalinen in beiden Festigkeitsarten, doch in verschiedenem Grade. Die rückwirkende Festigkeit des Rippenknorpels ist etwa 9mal so gross als seine absolute.

Auf das Festigkeitsverhältniss des entkalkten und calcinirten Knochens zum intacten ist bereits früher Rücksicht genommen.

Zusammenstellung der Moduli absoluter und rückwirkender Festigkeit aus den einzelnen Versuchsreihen.

Die angegebenen Werthe beziehen sich auf den Querschnitt von 1 □Mm. und sind in Kilogrammen ausgedrückt.

	Gegenstand	Feuchtigkeitszustand	Druckrichtung	Absol. Festigkeit	Rückwirkende Festigkeit
70jähriger Mann	Oberschenkelbein	frisch	parallel der Faser	7,75	13,21
56jährige Frau	»	»	»	6,35	13,07
28jähriger Mann	»	»	»	10,25	14,41
28 » »	»	trocken	»	11.58	18,63
30 » »	»	frisch	»	11,16	15,5
33 » »	»	»	»	—	16,6
40 » »	»	trocken	»	—	19,48
40 » »	»	»	senkrecht	—	17,8
30 » »	Schienbein	frisch	parallel	12,41	16,8
40 » »	»	trocken	»	—	17,24
40 » »	»	»	senkrecht	—	12,6
28 » »	Oberarmbein	frisch	parallel	9,25	12,56
30 » »	»	»	»	11,07	15,43
40 » »	»	trocken	»	—	13,65
40 » »	»	»	senkrecht	—	11,3
Rind	Schienbein	frisch	parallel	11,46	13,31
»	»	trocken	»	12,43	15,46
Kalb	»	frisch	»	8,93	12,26
Hausschwein	»	trocken	»	7,3	11,73
Wildschwein	»	»	»	10,29	14,71
Erwachsener Mensch	Lendenwirbel	frisch	»	—	0,84
» »	Schenkelknorren	»	»	—	0,96
Rind	Schienbein	trocken	»	—	17,91
»	»	calcinirt	»	—	5,96
»	»	entkalkt	»	1,51	2,72
Erwachsener Mensch	Rippenknorpel		»	0,17	1,57
» »	»		»	—	1,45

Tabelle der Moduli der Zug- und Druckfestigkeit verschiedener Körper.

Die Werthe beziehen sich auf 1 □Mm. Querschnitt und sind in Kilogrammen ausgedrückt.

Anorganische Körper.			Organische Körper.		
Gegenstand	Absolute F.	Rückwirk. F.	Gegenstand	Absolute F.	Rückwirk. F.
Gussstahl	102	—	Compacter Knochen	6,35—12,41	11,3—16,8
Schmiedeeisen	40,9	22	Knochenknorpel	1,51	2,72
Gusseisen	13	73	Rippenknorpel	0.17	1,57
Platin	34	—	Sehne	6,94	—
Kupfer (gehämmert)	23,8	41	Muskel	0,054	—
Gold	27	—	Nerv	0,93	—
Silber	29	—	Arterie	0,16	—
Bronce	25,6	—	Vene	0,12	—
Messing	12.4	110	Buchen-		
Zink	5,26	—	Eichen-	6,5	4,8
Blei	—	5,1	Fichten- u.		
Gneiss u. Granit	—	5,9	Tannenholz		
Kalkstein	—	3,6	Elfenbein	12	—
Sandstein	—	2,9	Walrosszahn	3	—
Ziegelstein	—	0,6	Rinderhorn	6,5	—
Mörtel	—	0,37	Fischbein	5,5	—

Biegungs-Elasticität und -Festigkeit.

Wie schon früher bemerkt, bietet die Biegung ein vorzügliches Mittel dar zur Bestimmung der Elasticitätsverhältnisse solcher Materialien, welche sich nicht oder schwer in hinreichend langen und gleichmässigen Stäben darstellen lassen, um damit directe Tensions- oder Pressionsversuche anstellen zu können. Die Biegungsmethode gewährt aber auch bei nicht zu geringer Länge des Untersuchungsobjectes grössere Sicherheit, indem die hieraus sich ergebenden Durchbiegungen verhältnissmässig grosse Werthe darstellen, die darum sicherer zu messen sind.

Da dessenungeachtet von Wertheim Tensionsversuche am Knochen bereits angestellt worden sind, so musste es ein besonderes Interesse bieten, die Ergebnisse der einen Methode mit denjenigen einer anderen vergleichen zu können. Die Biegung gestattete aber ausserdem nicht minder die Aussicht, über die Elasticitätsgrenze des Knochens und damit über diejenige Grenze Aufschluss zu erhalten, über welche hinaus der Knochen ohne Störung seiner Integrität Spannungen nicht ausgesetzt werden dürfe.

Aufgaben.

Bezeichnet S eine bestimmte Senkung, s diejenige bei $l$mal so grosser Länge, $b$facher Breite, $h$facher Dicke, so ist $s = \frac{l^3}{bh^3} \cdot S$. Die theoretische Entwicklung dieser Formel stützt sich auf die Voraussetzung eines gleichartigen Materials. Von einer solchen Gleichartigkeit

ist der Knochen, nicht minder auch das Holz, entfernt genug. Es war also zuzusehen, welche Annäherung an das Gesetz der Formel Biegungen mit Knochenmaterial erkennen lassen. Zur Erreichung dieses Zweckes gelangten verschiedene Längen und Querschnitte der Stäbchen zur Verwendung. Fernerhin war zu prüfen, ob und in welchen Grenzen Proportionalität zwischen Durchbiegung und Belastung vorhanden sei. Durch dieselben Versuchsreihen gelangte man auch zur Bestimmung der Elasticitätsgrösse und Elasticitätsgrenze des Knochens. Was erstere betrifft, so ergibt sich der Elasticitätsmodul aus der Durchbiegungsformel eines an beiden Enden gestützten, in der Mitte belasteten Stäbchens. Ist l die freie Länge, bh der rechteckige Querschnitt des Stäbchens, P das Gewicht, s die von ihm bewirkte elastische Senkung, so ist $E = \frac{1}{4} \cdot \frac{P}{s} \cdot \frac{l^3}{bh^3}$. Die Wirkung des Eigengewichtes des Stäbchens konnte vernachlässigt werden.

Die Elasticitätsgrösse und Elasticitätsgrenze waren hierauf für verschiedene Biegungsrichtungen zu untersuchen. An den einzelnen Stäbchen konnte diess nur in zwei auf einander senkrechten Richtungen geschehen. Nach einer dritten zu den übrigen senkrechten Richtung das Material kennen zu lernen hinderte die Unmöglichkeit, aus der geringen Dicke der compacten Knochentheile genügend lange Stäbchen zu gewinnen.

Eines besonderen Nachweises bedurfte der Einfluss der Temperatur und des Feuchtigkeitsgrades. Die Verhältnisse der elastischen Nachwirkung und des Rückstandes sind nicht unberücksichtigt geblieben. Endlich ist noch der Bestimmung der Biegungsfestigkeit zu gedenken.

Die Anwendung der erhaltenen Ergebnisse auf den ganzen Knochen ist dem folgenden Abschnitt zugewiesen.

Biegungsapparat.

Zur Untersuchung der Biegungselasticität eines Körpers ist es zweckmässiger, letzeren mit beiden Enden auf Unterlagen zu legen und in der Mitte mit Gewichten zu beschweren, als ihn bloss an dem einen Ende zu befestigen und an dem andern zu belasten.

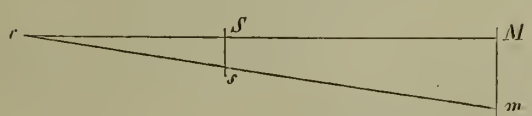
Der Apparat, dessen sich zu ihren Versuchen Eytelwein und Gerstner bedienten, besteht aus zwei mit Eisenlagern versehenen Rüstböcken, auf welche der zu biegende parallelepipedische Körper zu liegen kommt. Die zur Biegung verwendete Last liegt auf einer Wagschale, die an einem Bügel hängt, dessen oberer Theil mit abgerundeter Unterfläche in der Mitte des Körpers aufruht. Um die einer Last entsprechende Durchbiegung zu messen, wendete Eytelwein zwei feine Horizontalfäden sowie eine auf der Mitte des Balkens aufsitzende Scala an. Gerstner bediente sich eines einarmigen Fühlhebels, welcher mit seinem längeren Ende an einer vertical gestellten Scala die Senkung angab. Lagerhjelm verwendete einen Zeiger, der mittelst eines Fadens und einer Rolle in Bewegung gesetzt wurde und die Senkung auf einer Kreisscheibe vergrössert angab. Morin und Andere bedienten sich eines Kathetometers, welches auf eine in der Mitte des Balkens angebrachte Marke gerichtet war; oder einer Mikrometerschraube.

Der von mir verwendete Apparat entspricht dem von Gerstner[1] construirten und vermag Senkungen von $^1/_{64}$ Mm. genau anzugeben.

Er besteht aus einem Tischchen mit vorragender eiserner Deckplatte, die auf ihren Seiten verschieden weite Ausschnitte besitzt. In der Regel bediente ich mich desjenigen Ausschnittes, dessen Spannweite 80 Millimeter beträgt. Als Objectträger fungiren zwei in der Flucht der Seitenränder des Ausschnittes hervorragende kantig zugeschärfte niedrige Messingstützen.

Ein aus demselben Material gefertigter Bügel, der an seinem unteren Ende die Wagschale trägt, wird mittelst einer abwärts gerichteten Schneide seines Querbalkens auf die Mitte des zu biegenden Stäbchens niedergelassen. Dieser abwärts gerichteten Schneide entgegengesetzt befindet sich eine eben solche zweite, nach aufwärts gerichtete, die erstere rechtwinkelig kreuzend; sie ist es, auf welcher der Fühlhebel in 2 Centimeter Entfernung von seiner Drehaxe leicht aufruht. Rückwärts von dieser Drehaxe besitzt nämlich der Fühlhebel ein Gegengewicht, welches soweit nach hinten geschraubt werden kann, dass nur ein minimaler Druck des Fühlhebels auf die Schneide fällt. In der Gegend dieses Berührungspunktes ist die Unterfläche des Fühlhebels mit einem 3 Centimeter langen gerundeten Stahlstreifen ausgelegt, so dass ein gesichertes Gleiten bewirkt ist; nach vorne läuft er in einen feinen Stahlfaden aus. Seitliche Schwankungen sind dadurch vollkommen beseitigt, dass die Drehaxe in einer 2 Centimeter langen Axenführung liegt. 32 Centimeter von der Axe entfernt befindet sich an einer horizontalliegenden schmalen Stahlplatte, die auch die Axenführung trägt, der vertikal nach abwärts gerichtete, in halbe Millimeter eingetheilte Massstab.

Bedeutet *cM* den Fühlhebel, *S* die Lage der oberen Bügelschneide, *Mm* den Massstab, so sind, da die Schneide des Bügels bei den Senkungen eines Stäbchens sich genau in vertikaler Linie herabbewegt und der Massstab senkrecht steht, die Dreiecke *cSs* und *cMm* bei den verschiedenen Lagen des Fühlhebels einander ähnlich. Da nun aber bei horizontaler Lage des Fühlhebels die Entfernung seiner Axe von dem Massstab 32 Centimeter, von der Bügelschneide aber 2 Centimeter beträgt, so verhält sich $Mm : Ss = 32 : 2$, d. h. der Senkung am Massstab entspricht eine 16mal geringere Senkung der Mitte des Stäbchens; der Massstab selbst ist aber in halbe Millimeter getheilt und Senkungen von $^1/_4$ Millimeter am Massstab können darum leicht unterschieden werden.



Herstellung der Stäbchen und Methode ihrer Biegung.

Die Herstellung der Stäbchen, die sämmtlich der Compacta verschiedener Röhrenknochen entstammten, geschah ganz in der Weise, die zur Herstellung von Knochenwürfeln angewendet und oben beschrieben worden ist. Der Querschnitt der Stäbchen war rechteckig, zum Theil quadratisch. Die Dicke und Breite der Stäbchen wurde von dem Ver-

1) v. Gerstner, Handbuch der Mechanik.

such mikrometrisch gemessen, und zwar bei 30facher Vergrösserung. Zwei feine Linien, im Abstand von 80 Millimetern an den im Ganzen 100 Millimeter langen Stäbchen angebracht, sowie eine dritte, die Mitte einnehmende, bestimmten die Lage eines Stäbchens auf den Trägern sowie die Lage der unteren Bügelschneide auf dem Stäbchen. Die Mittel zur Feuchthaltung sind die früher angegebenen.

Die Biegungsmethode ist in der Mehrzahl der Versuche die der rasch unterbrochenen Belastung; sobald die sofortige Wirkung einer Belastung abgelesen worden war, folgte völlige Entlastung des Stäbchens auf verschiedene, durch die Dauer der elastischen Nachwirkung bestimmte Zeit hinaus. Kam es dagegen darauf an, den Einfluss der Dauer einer Belastung kennen zu lernen, so blieb ein bestimmtes Gewicht so lange thätig, bis eine weitere Senkung nicht mehr bemerkt werden konnte; diese Fälle sind besonders bezeichnet.

Biegungsversuche.

Elastische Biegung ist im Folgenden der bei der rückgängigen Phase der Bewegung, die der Entlastung folgt, verschwindende Theil der totalen Biegung genannt, sei es, dass die rückgängige Bewegung mit oder ohne elastische Nachwirkung verläuft. Der mit der rückgängigen Bewegung nicht verschwindende Theil der Totalbiegung heisst Rückstand.

Die Belastungen sind in Grammen, die Biegungen, Biegungszuwüchse, der Mittelwerth der letzteren, die elastische Nachwirkung und der Rückstand sind wie die Beobachtung sie ergab, zweiunddreissigfach vergrössert in Millimetern angegeben. Der Werth des Elasticitätsmodul bezieht sich auf den Querschnitt von 1 □Mm. und ist in Kilogrammen ausgedrückt.

Das Gewicht des Bügels, der während einer ganzen Versuchsdauer ein Stäbchen belastete, beträgt 2 Gramm. Das Gewicht der Wagschale, die nur unterbrochen als Belastung wirkt, ist 10 Gramm. Die Temperatur, bei der die Mehrzahl der Versuche ausgeführt ist, schwankte etwa zwischen 15 und 25° C.; höhere oder niedrigere Temperaturen sind bei den Versuchen selbst angegeben.

a) Einfluss der Dimensionen, der Druckrichtung und der Herkunft der Stäbchen auf die Biegung; Elasticitätsgrösse.

Trockene Stäbchen.

Versuch 1) Oberschenkelbein eines Mannes von mittlerem Alter.
Abstand der Objectträger, d. i. die in Rechnung gebrachte Länge des Stäbchens 80,
Breite $\frac{79}{30}$, Dicke $\frac{79}{30}$ Millimeter.
Messung der Biegungen.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	3,5	3,5	3,5	—	—
200	7	7	3,5	—	—
300	10,5	10,5	3,5	—	—
400	14	14	3,5	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 3,5

Elasticitätsmodul 2433 $\frac{\text{Kgr.}}{\square\text{Mm.}}$

Versuch 2) Dasselbe Stäbchen, 90° um seine Längenaxe gedreht und wie vorher belastet, gibt dieselben Werthe wie V. 1.

Versuch 3) Dasselbe Stäbchen, um weitere 90° nach derselben Richtung gedreht wie V. 2. und ebenso belastet, gibt dieselben Werthe.

Versuch 4) Dasselbe Stäbchen, bei einem Abstand der Träger von 100 Millimetern.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	E. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	6,5	6,5	6,5	—	—
200	13	13	6,5	—	—
300	20	20	7	0,5	—
400	27	27	7	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 6,75
» berechnet aus Versuch 1 = 6,84

Versuch 5) Dasselbe Stäbchen, in der Lage von Vers. 1 von oben nach unten abgeschliffen auf eine Dicke $\frac{35}{30}$ Mm. Breite $\frac{79}{30}$, Länge 80 Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	39,5	39,5	39,5	—	—
200	79,5	79,5	40	0,5	—
300	120	120	40,5	1	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 40
» berechnet aus Vers. 1 = 40,2
Elasticitätsmodul 2448.

Versuch 6) Dasselbe Stäbchen, bei 100 Mm. Länge. Breite $\frac{79}{30}$, Dicke $\frac{35}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	78	78	78	—	—
200	156,5	156,5	78,5	0,5	—
300	235,5	235,5	79	2	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 78,5
» berechnet aus Vers. 1 = 78,1

Versuch 7) Dasselbe Stäbchen, auf die Schmalseite gestellt. Länge 80, Breite $\frac{35}{30}$, Dicke $\frac{79}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	8	8	8	—	—
200	16	16	8	—	—
300	24	24	8	1	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 8
» berechnet aus V. 1 = 7,9

Versuch 8) Oberschenkelbein eines 70jährigen Mannes.
Länge des Stäbchens 80, Breite $\frac{24}{30}$, Dicke $\frac{24}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
200	4	4	4	—	—
400	8	8	4	—	—
600	11,5	11,5	3,5	—	—
800	15,5	15,5	4	—	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 1,94
Elasticitätsmodul 2195

Versuch 9) Dasselbe Stäbchen, 90° um seine Längenaxe gedreht und wie vorher belastet, gibt dieselben Zahlen.

Versuch 10) Dasselbe Stäbchen, auf eine Dicke von $\frac{48}{30}$ Mm. abgeschliffen. Breite $\frac{34}{30}$, Länge 80 Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	13	13	13	—	—
200	27	27	14	—	—
300	40	40	13	0,5	—
400	54	54	14	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 13,5
» berechnet aus Vers. 8 = 14,46
Elasticitätsmodul 2364

Versuch 11) Dasselbe Stäbchen, auf die Schmalseite gestellt. Länge 80, Breite $\frac{18}{30}$, Dicke $\frac{34}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	3,5	3,5	3,5	—	—
200	7,5	7,5	4	—	—
300	11,5	11,5	4	—	—
400	15	15	3,5	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 3,75
» berechnet aus V. 8 = 3,8

Versuch 12) Oberarmbein eines 30jährigen Mannes.
Länge 80, Breite $\frac{52}{30}$, Dicke $\frac{54}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	20,5	20,5	20,5	—	—
200	41	41	20,5	—	—
300	62	62	21	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 20,66
Elasticitätsmodul 1961

Versuch 13) Ein anderes Stäbchen desselben Oberarmbeins.
Länge 80, Breite $\frac{55}{30}$, Dicke $\frac{55}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	16	16	16	—	—
200	32	32	16	—	—
300	47	47	15	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 15,66
Elasticitätsmodul 2315

Frische, feuchterhaltene Stäbchen.

Versuch 14) Schienbein eines 46jährigen Mannes. Stäbchen vom Schienbeinkamm.
Länge 80, Breite $\frac{82}{30}$, Dicke $\frac{82}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	3,5	3,5	3,5	—	—
200	7	7	3,5	—	—
300	9,5	9,5	2,5	—	—
400	14	14	4,5	—	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 3,5
Elasticitätsmodul 2045

Versuch 15) Dasselbe Stäbchen, 90° um seine Längenaxe gedreht. Die Reihe der Biegungszuwüchse folgt hier in der Weise: 3,5 2,5 4,5 3,5.

Versuch 16) Dasselbe; von innen abgeschliffen auf eine Dicke von $\frac{45}{30}$ Mm.; Breite $\frac{82}{30}$, Länge 80 Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	19	19	19	—	—
200	38	38	19	—	—
300	57	57	19	0,5	—
400	76,5	76,5	19,5	1	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 19,12
» » berechnet aus Vers. 11 = 21,21
Elasticitätsmodul = 2337

Versuch 17) Dasselbe Stäbchen, auf die Schmalseite gestellt. Breite $\frac{45}{30}$, Dicke $\frac{82}{30}$, Länge 80 Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	6,5	6,5	6,5	—	—
200	13	13	6,5	—	—
300	19,5	19,5	6,5	—	—
400	25,5	25,5	6	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 6,38
» » berechnet aus Vers. 14 = 6,06

Versuch 18) Stäbchen aus der lateralen Wand desselben Schienbeins. Die Breitseiten entsprechen den Oberflächen des Schienbeins, die Schmalseiten seiner Dickenrichtung. Die Breitseiten sind soweit zugeschliffen, dass sie vollkommen ebene Flächen darstellten.
Länge 80, Breite $\frac{95}{30}$, Dicke $\frac{80}{30}$, Länge 80 Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
200	6	6	6	—	—
400	11,5	11,5	5,5	—	—
600	17	17	5,5	—	—
800	23	23	6	0,5	—

Mittlere Biegung für 200 Gramm = 5,75
Elasticitätsmodul = 2372

Versuch 19) Dasselbe Stäbchen, 180° um seine Längenaxe gedreht. Die Biegungszuwüchse bilden hier folgende Reihe: 6, 6,5 5,5 6.

Versuch 20) Dasselbe Stäbchen auf die Schmalseite gestellt. Breite $\frac{80}{30}$, Dicke $\frac{95}{30}$, Länge 80 Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
200	4	4	4	—	—
400	8	8	4	—	—
600	12	12	4	—	—
800	16	16	4	0,5	—

Mittlere Biegung für 200 Gramm = 4
» » berechnet aus Vers. 18 = 4,08

Versuch 21) Dasselbe Stäbchen, 180° um seine Längenaxe gedreht.
Die Biegungszuwüchse bilden hier folgende Reihe: 3,5 4, 4,5 3,5.

Versuch 22) Dasselbe Stäbchen, nach Zuschleifung von der inneren Breitseite aus auf eine Dicke von $\frac{53}{30}$ Mm.; Breite $\frac{95}{30}$, Länge 80 Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	8,5	8,5	8,5	—	—
200	19	19	10,5	—	—
300	28	28	9	—	—
400	38	38	10	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 9,5
» » berechnet aus Vers. 20 = 9,5
Elasticitätsmodul = 2469

Versuch 23) Dasselbe Stäbchen, 180° um seine Längenaxe gedreht.
Die Biegungszuwüchse bilden hier folgende Reihe: 9, 10, 9, 10,5.

Versuch 24) Dasselbe Stäbchen, auf die Schmalseite gestellt.
Breite $\frac{53}{30}$, Dicke $\frac{95}{30}$, Länge 80 Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
200	6	6	6	—	—
400	11,5	11.5	5,5	—	—
600	18	18	6.5	—	—
800	23,5	23,5	5,5	0,5	—

Mittlere Biegung für 200 Gramm = 5,87
» » berechnet aus Vers. 22 = 5,8

Versuch 25) Dasselbe Stäbchen, 180° um seine Längenaxe gedreht und ebenso belastet.
Die Biegungszuwüchse bilden hier folgende Reihe: 6, 5,5 6, 6.

Versuch 26) Stäbchen aus der medialen Wand desselben Schienbeins. Die Breitseiten entsprechen den Flächen der Schienbeinwand, die Schmalseiten ihrer Dickenrichtung. Von der Innenfläche der Wand aus ist letztere zur Stäbchendicke abgeschliffen. Die Aussenfläche ist nur soweit angeschliffen, als die Herstellung einer ebenen Fläche erforderte.
Länge 80, Breite $\frac{98}{30}$, Dicke $\frac{58}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
200	17,5	17,5	17,5	—	—
400	35	35	17,5	—	—
600	52	52	17	1	—

Mittlere Biegung für 200 Gramm = 17,33
» » berechnet aus Vers. 28 = 17.2
Elasticitätsmodul = 2000.

Versuch 27) Dasselbe Stäbchen, 180° um seine Längenaxe gedreht und wie vorher belastet.
Die Biegungszuwüchse bilden hier folgende Reihe: 17, 17, 18.

Versuch 28) Dasselbe Stäbchen auf die Schmalseite gestellt. Breite $\frac{58}{30}$, Dicke $\frac{98}{30}$, Länge 80 Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
200	6	6	6	—	—
400	12	12	6	—	—
600	18	18	6	—	—
800	24	24	6	0,5	—

Mittlere Biegung für 200 Gramm = 6.

Versuch 29) Oberschenkelbein desselben Mannes. Stäbchen vom Aussentheil der Knochenwand. Die Aussenfläche ist nur soweit angeschliffen, als die Herstellung einer ebenen Fläche erforderte. Die Aussenfläche liegt bei der Biegung unten.
Länge 80, Breite $\frac{97}{30}$, Dicke $\frac{52}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs		El. Nachwirkung	Rückstand
50	5	5	5	11	—	—
100	11	11	6		—	—
150	17	17	6	11,5	—	—
200	22,5	22,5	5,5		—	—
300	34	34	11,5		—	—
400	45,5	45,5	11,5		0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 11,38
» » berechnet aus Vers. 31 = 11,3
Elasticitätsmodul = 2137

Versuch 30) Dasselbe Stäbchen, 180° um seine Längenaxe gedreht und wie zuvor belastet. Die Biegungszuwüchse bilden hier folgende Reihe: 11, 11, 11,5 11,5.

Versuch 31) Dasselbe Stäbchen auf die Schmalseite gestellt. Breite $\frac{52}{30}$, Dicke $\frac{97}{30}$, Länge 80 Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
200	6	6	6	—	—
400	13	13	7	—	—
600	19	19	6	—	—
800	26	26	7	0,5	—

Mittlere Biegung für 200 Gramm = 6,5

Versuch 32) Dasselbe Stäbchen, 180° um seine Längenaxe gedreht und wie zuvor belastet. Die Biegungszuwüchse bilden hier folgende Reihe: 6,5 6,5 6, 7.

Versuch 33) Ein anderes Stäbchen von der Aussenwand desselben Oberschenkelbeins. Die Aussenfläche liegt beim Versuch unten.
Länge 80, Breite $\frac{103}{30}$, Dicke $\frac{50}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	12	12	12	—	—
200	24	24	12	—	—
300	37	37	13	0,5	—
400	39,5	39,5	12,5	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 12,38
Elasticitätsmodul = 2081

Versuch 34) Dasselbe Stäbchen, 180° um seine Längenaxe gedreht und wie zuvor belastet. Die Biegungszuwüchse bilden hier folgende Reihe: 13, 12,5 12,5 13.

Versuch 35) Stäbchen aus den inneren, der Markhöhle nächsten Schichten der Compacta desselben Oberschenkelbeins.
Länge 80, Breite $\frac{110}{30}$, Dicke $\frac{55}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	8	8	8	—	—
200	15,5	15,5	7,5	—	—
300	23	23	7,5	—	—
400	31	31	8	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 7,75
Elasticitätsmodul 2339

Versuch 36) Dasselbe Stäbchen 180° um seine Längenaxe gedreht und wie zuvor belastet. Die Biegungszuwüchse bilden hier folgende Reihe: 7,5 7,5 8 8.

Versuch 37) Dasselbe Stäbchen auf die Schmalseite gestellt. Breite $\frac{5}{30}$, Dicke $\frac{1,1,0}{30}$, Länge 80 Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
200	4,5	4,5	4,5	—	—
400	9	9	4,5	—	—
600	14	14	5	—	—
800	18	18	4	0,5	—

Mittlere Biegung für 200 Gramm = 4,5
» » berechnet aus Vers. 35 = 3,87

Versuch 38) Ein zweites Stäbchen aus den inneren Schichten der Compacta desselben Oberschenkelbeins.
Länge 80, Breite $\frac{1,0,5}{30}$, Dicke $\frac{5,3}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	9	9	9	—	—
200	17,5	17,5	8,5	—	—
300	26,5	26,5	9	—	—
400	35	35	8,5	—	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 8,75
Elasticitätsmodul = 2424

Versuch 39) Dasselbe Stäbchen, 180° um seine Längenaxe gedreht und wie zuvor belastet. Die Biegungszuwüchse bilden hier folgende Reihe: 8, 9, 9, 8,5.

Versuch 40) Dasselbe Stäbchen auf die Schmalseite gestellt. Breite $\frac{5,3}{30}$, Dicke $\frac{1,0,5}{30}$, Länge 80 Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
200	5	5	5	—	—
400	10	10	5	—	—
600	15	15	5	—	—

Mittlere Biegung für 200 Gramm = 5
» » berechnet aus Vers. 38 = 4,46

Versuch 41) Dasselbe Stäbchen 180° um seine Längenaxe gedreht. Die Biegungszuwüchse bilden hier folgende Reihe: 4,5 5,5 4,5 5,5.

Versuch 42) Ein drittes Stäbchen aus den tieferen Wandschichten der Compacta desselben Oberschenkelbeins.
Länge 80, Breite $\frac{1,0,6}{30}$, Dicke $\frac{5,5}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	8,5	8,5	8,5	—	—
200	18	18	9,5	—	—
300	26	26	8	—	—
400	34	34	8	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 8,5
Elasticitätsmodul = 2213

Versuch 43) Dasselbe Stäbchen 180° um seine Längenaxe gedreht und wie zuvor belastet. Die Biegungszuwüchse bilden hier folgende Reihe: 8,5, 8,5, 9, 8,5.

Versuch 44) Ein viertes Stäbchen aus den tiefen Schichten der Compacta desselben Oberschenkelbeins.
Länge 80, Breite $\frac{104}{30}$, Dicke $\frac{48}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	15	15	15,4	—	—
200	30,5	30,5	15,5	—	—
300	46	46	15,5	—	—
400	61	61	15	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 15.25
Elasticitätsmodul = 1891

Versuch 45) Dasselbe Stäbchen 180° um seine Längenaxe gedreht und wie zuvor belastet.
Die Biegungszuwüchse bilden hier folgende Reihe: 15, 16, 15, 15.

Stäbchen vom Oberschenkelbein des Rindes.

Versuch 46) Erstes Stäbchen, frisch und feucht erhalten.
Länge 80, Breite $\frac{110}{30}$, Dicke $\frac{55}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	7	7	7	—	—
200	14	14	7	—	—
300	19,5	19,5	5,5	—	—
400	28,5	28,5	9	—	—
500	35	35	6.5	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 7
Elasticitätsmodul = 2590

Versuch 47) Dasselbe Stäbchen 180° um seine Längenaxe gedreht und wie zuvor belastet.
Die Biegungszuwüchse bilden hier folgende Reihe: 7, 7, 7, 7, 7.

Versuch 48) Dasselbe Stäbchen auf die Schmalseite gestellt. Breite $\frac{55}{30}$, Dicke $\frac{110}{30}$, Länge 80 Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
200	3,5	3,5	3,5	—	—
400	7	7	4	—	—
600	10,5	10,5	3,5	—	—
800	14,5	14,5	4	0.5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 3,75
» » berechnet aus Vers. 47 = 3,5

Versuch 49) Zweites Stäbchen desselben Oberschenkelbeins, feucht erhalten.
Länge 80, Breite $\frac{104}{30}$, Dicke $\frac{54}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	7,5	7,5	7,5	—	—
200	15,5	15,5	8	—	—
300	22	22	6,5	—	—
400	29,5	29,5	7,5	—	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 7,38
Elasticitätsmodul = 2743

Versuch 50) Dasselbe Stäbchen 180° um seine Längenaxe gedreht und wie zuvor belastet. Die Biegungszuwüchse bilden hier folgende Reihe: 7,5 7,5 7 7,5.

Versuch 51) Dasselbe Stäbchen auf die Schmalseite gestellt. Breite $\frac{54}{30}$, Dicke $\frac{104}{30}$, Länge 80 Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
200	4	4	4	—	—
400	8,5	8,5	4,5	—	—
600	13	13	4,5	—	—
800	17	17	4	—	—

Mittlere Biegung für 200 Gramm = 4,25
» » berechnet aus Vers. 49 = 3,98

Versuch 52) Drittes Stäbchen desselben Oberschenkelbeins, feucht erhalten. Länge 80, Breite $\frac{110}{30}$, Dicke $\frac{53}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	El. Biegung	El. Biegungszuwachs	El. Nachwirkung	Rückstand
100	8	8	8	—	—
200	16,5	16,5	8,5	—	—
300	25	25	8,5	—	—
400	32,5	32,5	7,5	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm = 8,12
Elasticitätsmodul = 2495

Versuch 53) Dasselbe Stäbchen, 180° um seine Längenaxe gedreht und wie zuvor belastet. Die Biegungszuwüchse bilden hier folgende Reihe: 8,5 8,5 10,5 6,5.

Einfluss des Feuchtigkeitszustandes auf die Elasticitätsgrösse.

Der Einfluss des Wassergehaltes organischer Körper auf ihre Elasticität lässt sich am besten in der Art prüfen, dass man ein und denselben Gegenstand zuerst im frischen, wasserhaltigen Zustand und darauf nach geschehener Trocknung in gleicher Weise untersucht. Mehrere im frischen Zustand untersuchte Knochenstäbchen wurden nicht weiter ausgetrocknet, als es mehrtägiges Liegen in der atmosphärischen Luft vermochte.

Hierbei ist hervorzuheben, dass durch Austrocknung die Dimensionen feuchter Knochen sich vermindern. Beim Nachmessen der getrockneten Stäbchen, die schon vom feuchten Zustand her die Abmessungslinien besassen, war ich nicht wenig überrascht zu sehen, dass an 80 Millimeter Länge $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, selbst $\frac{1}{2}$ Millimeter zu fehlen pflegte. Mehrere bloss in dieser Absicht ausgeführte Messungen von Stäbchen zuerst im feuchten und darauf im trocknen Zustand gelangten zu demselben Ergebniss. Auch die beiden übrigen Dimensionen liessen einigemal unter dem Mikroskop eine kleine Abnahme erkennen.

Hieraus geht hervor, dass z. B. der Rauminhalt trockner Schädel nicht ohne Weiteres mit demjenigen frischer Schädel und umgekehrt verglichen werden könne. Würde man das Maass der obengenannten Schrumpfung zu Grunde legen, so wäre die Volumverminderung des Schädelraumes durch Trocknung nicht unbeträchtlich. Doch werden erst directe Versuche hierüber entscheiden können.

Die frisch und trocken auf Biegung untersuchten Stäbchen sind die der Versuche 27, 33, 44 und 46. — Die Längendimension wurde neu aufgetragen.

Versuch 54) Oberschenkelbein des 46jährigen Mannes.
Länge 80, Breite $\frac{97}{30}$, Dicke $\frac{52}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung frisch	Totalbiegung trocken	El. Biegung frisch	El. Biegung trocken	El. Biegungszuwachs frisch	El. Biegungszuwachs trocken	El. Nachwirkung frisch	El. Nachwirkung trocken	Rückstand
100	11	9	11	9	11	9	—	—	—
200	22,5	19	22,5	19	11,5	10	—	—	—
300	34	28,5	34	28,5	11,5	9,5	—	—	—
400	45,5	38	45,5	38	11,5	9,5	0,5	0,5	—

Mittlere Biegung des frischen Stäbchens für 100 Gramm = 11,38
» » » trocknen » » » » = 9,5
Elasticitätsmodul des frischen Stäbchens = 2137
» » trocknen » = 2560

Versuch 55) Ein anderes Stäbchen desselben Oberschenkelbeins.
Länge 80, Breite $\frac{103}{30}$ Dicke $\frac{50}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung frisch	Totalbiegung trocken	El. Biegung frisch	El. Biegung trocken	El. Biegungszuwachs frisch	El. Biegungszuwachs trocken	El. Nachwirkung frisch	El. Nachwirkung trocken	Rückstand
100	12	11	12	11	12	11	—	—	—
200	24	22	24	22	12	11	—	—	—
300	37	33	37	33	13	11	0,5	—	—
400	49,5	44,5	49,5	44,5	12,5	11,5	0,5	0,5	—

Mittlere Biegung des frischen Stäbchens für 100 Gramm = 12,38
» » » trocknen » » » » = 11,15
Elasticitätsmodul des frischen Stäbchens = 2081
» » trocknen » = 2311

Versuch 56) Ein drittes Stäbchen desselben Oberschenkelbeins.
Länge 80, Breite $\frac{104}{30}$, Dicke $\frac{48}{30}$.

Belastung	Totalbiegung frisch	Totalbiegung trocken	El. Biegung frisch	El. Biegung trocken	El. Biegungszuwachs frisch	El. Biegungszuwachs trocken	El. Nachwirkung frisch	El. Nachwirkung trocken	Rückstand
100	15	14	15	14	15	14	—	—	—
200	30,5	27,5	30,5	27,5	15,5	13,5	—	—	—
300	46	41,5	46	41,5	15,5	14	—	—	—
400	61	56	61	56	15	14,5	0,5	0,5	—

Mittlere Biegung des frischen Stäbchens für 100 Gramm = 15,25
» » » trocknen » » » » = 14
Elasticitätsmodul des frischen Stäbchens = 1891
» » trocknen » = 2065

Versuch 57) Dasselbe Stäbchen, welches nach der Trocknung auf mehrere Tage wieder in Wasser gelegt worden war. Das Ergebniss ist mit dem des frischen Stäbchens verglichen.

Belastung	Totalbiegung frisch	Totalbiegung gewässert	El Biegung frisch	El Biegung gewässert	El. Biegungszuwachs frisch	El. Biegungszuwachs gewässert	El. Nachwirkung frisch	El. Nachwirkung gewässert	Rückstand
100	15	15,5	15	15,5	15	15,5	—	—	—
200	30,5	31,5	30,5	31,5	15,5	16	—	—	—
300	46	47	46	47	15,5	15,5	—	0,5	—
400	61	63	61	63	15	16	0,5	1	—

Mittlere Biegung des frischen Stäbchens für 100 Gramm = 15,25
» » » gewässerten » » » » = 15,75
Elasticitätsmodul des frischen Stäbchens = 1891
» » gewässerten » = 1831

Versuch 58) Oberschenkelbein des Rindes.
Länge 80, Breite $\frac{11}{30}$, Dicke $\frac{55}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung frisch	Totalbiegung trocken	El. Biegung frisch	El. Biegung trocken	El. Biegungszuwachs frisch	El. Biegungszuwachs trocken	El. Nachwirkung frisch	El. Nachwirkung trocken	Rückstand
100	7	6,5	7	6,5	7	6,5	—	—	—
200	14	13	14	13	7	6,5	—	—	—
300	21	20	21	20	7	7	—	—	—
400	28	27	28	27	7	7	0,5	0,5	—

Mittlere Biegung des frischen Stäbchens für 100 Gramm = 7
» » » trocknen » » » » = 6,75
Elasticitätsmodul des frischen Stäbchens = 2590
» » trocknen » = 2619

Einfluss der Temperatur auf die Elasticitätsgrösse.

Die Wirkung verschiedener Temperatur auf die Durchbiegung macht sich sowohl am trocknen als auch am frischen Knochen bemerkbar. Zur Erreichung niederer Temperatur wurde in dem Untersuchungsraum die grössere Wärme der Jahreszeit auf 10° C. künstlich herabgedrückt. Die grössere Wärme ward für trockne Stäbchen dadurch hervorgebracht, dass ich dieselben mit dem Apparat genügende Zeit hindurch den Sonnenstrahlen aussetzte und während ihrer Wirkung die Untersuchung vornahm. Ein Thermometer gab die Temperatur zu 40° C. an.

Feuchte Stäbchen wurden erwärmt durch kurzes Einlegen in auf 38° C. gebrachtes Wasser und passende Beträuflung mit demselben während des Versuchs.

Es stellt sich als unzweifelhaftes Ergebniss heraus, dass der Elasticitätsmodul durch Erwärmung der Substanz eine Abnahme erleide.

Versuch 59) Oberarmbein eines Mannes. Siehe Vers. 13.
Trocknes Stäbchen, Länge 80, Breite $\frac{55}{30}$, Dicke $\frac{55}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung 10°	Totalbiegung 40°	El. Biegung 10°	El. Biegung 40°	El. Biegungszuwachs 10°	El. Biegungszuwachs 40°	El. Nachwirkung 10°	El. Nachwirkung 40°	Rückstand
100	16	17	16	17	16	17	—	—	—
200	32	35	32	35	16	18	—	—	—
300	47	52	47	52	15	17	0,5	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm bei 10° = 15,66
» » » » » » 40° = 17,33
Elasticitätsmodul bei 10° = 2315
» » 40° = 2091

Versuch 60) Schienbein eines 46jährigen Mannes. S. Vers. 16.
Frisches Stäbchen, Länge 80, Breite $\frac{82}{30}$, Dicke $\frac{45}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung		El. Biegung		El. Biegungszuwachs		El. Nachwirkung		Rückstand
	10^0	38^0	10^0	38^0	10^0	38^0	10^0	38^0	
100	19	21	19	21	19	21	—	—	—
200	38	43	38	43	19	22	—	—	—
300	57	64	57	64	19	21	—	—	—
400	76	87	76	87	19	23	0,5	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm bei $10^0 = 19$
» » » » » » $38^0 = 21{,}75$
Elasticitätsmodul bei $10^0 = 2337$
» » $38^0 = 2041$

Versuch 61) Ein zweites frisches Stäbchen desselben Schienbeins. S. Vers. 26.
Länge 80, Breite $\frac{98}{30}$, Dicke $\frac{58}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung		El. Biegung		El. Biegungszuwachs		El. Nachwirkung		Rückstand
	10^0	38^0	10^0	38^0	10^0	38^0	10^0	38^0	
100	8,5	9	8,5	9	8,5	9	—	—	—
200	18	19	18	19	9,5	10	—	—	—
300	26,5	28	26,5	28	8,5	9	—	—	—
400	35	38	35	38	8,5	10	0,5	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm bei $10^0 = 8{,}75$
» » » » » » $38^0 = 9{,}5$
Elasticitätsmodul bei $10^0 = 1983$
» » $38^0 = 1871$

Versuch 62) Oberschenkelbein desselben Mannes. S. Vers. 42.
Frisches Stäbchen, Länge 80, Breite $\frac{106}{30}$, Dicke $\frac{55}{30}$ Mm.

Belastuug	Totalbiegung		El. Biegung		El. Biegungszuwachs		El. Nachwirkung		Rückstand
	10^0	38^0	10^0	38^0	10^0	38^0	10^0	38^0	
100	8,5	9	8,5	9	8,5	9	—	—	—
200	17	18	17	18	8,5	9	—	—	—
300	25	27	25	27	8	9	—	—	—
400	34	36,5	34	36,5	9	9,5	0,5	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm bei $10^0 = 8{,}5$
» » » » » » $38^0 = 9{,}12$
Elasticitätsmodul bei $10^0 = 2213$
» » $38^0 = 1982$

Versuch 63) Oberschenkelbein des Rindes. S. Vers. 49.
Frisches Stäbchen, Länge 80, Breite $\frac{104}{30}$, Dicke $\frac{54}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung		El. Biegung		El. Biegungszuwachs		El. Nachwirkung		Rückstand
	10^0	38^0	10^0	38^0	10^0	38^0	10^0	38^0	
100	7,5	8	7,5	8	7,5	8	—	—	—
200	15	16	15	16	7,5	8	—	—	—
300	22	24	22	24	7	8	—	—	—
400	29	32	29	32	7	8	0,5	0,5	—

Mittlere Biegung für 100 Gramm bei $10^0 = 7{,}25$
» » » » » » $38^0 = 8$
Elasticitätsmodul bei $10^0 = 2794$
» » $38^0 = 2532$

Elasticitätsgrenze. Proportionalität der Biegungen und Belastungen.

Die rückgängige Bewegung gebogener Stäbchen, die der Entlastung folgt, geschieht, wenn die Belastung eine gewisse Grenze nicht überschritten hat, ebenso schnell als vollständig. Mit der Steigerung der Belastung aber tritt für die rückgängige Bewegung eine Theilung ein in eine augenblicklich und eine langsam zurückzulegende Strecke. Der langsam verlaufende Theil der Bewegung, der im Vorausgehenden elastische Nachwirkung genannt ist, erreicht sein Ende um so langsamer, je näher er an den Ausgangspunkt der Bewegung heranrückt. In allen bisherigen Versuchsreihen genügten indess in den äussersten Grenzen gegen 15 Minuten zur Erreichung desselben. Einigemal wollte es mir scheinen, als ob bei frischen Stäbchen selbst ein Ueberschreiten des Ausgangspunktes nach der der Biegung entgegengesetzten Seite hin in freilich sehr geringem Grade vorkäme; doch möchte ich vorläufig hierauf kein weiteres Gewicht legen und fernere Beobachtungen abwarten.

In allen bisher beschriebenen Versuchen konnte die Wirkung grösserer Belastungen nicht geprüft werden. Denn zur Bestimmung des Einflusses der Dimensionen, verschiedener Druckrichtungen, der Feuchtigkeit und Wärme musste ein und dasselbe Stäbchen wiederholten Biegungen ausgesetzt, solche Biegungen darum vermieden werden, welche die Elasticitätsgrenze überschritten oder allzunahe an dieselbe herantraten. Erst nach Erreichung dieses Zieles stand nichts im Wege, sie über jene Grenze hinausgehenden Spannungen zu unterwerfen. Ausser solchen, die schon zu den genannten Zwecken gedient hatten, fand übrigens auch eine grössere Reihe vorher noch nicht gebogener Stäbchen hiezu Verwendung. Schliesslich wurde der grösste Theil den Bruch herbeiführenden Belastungen ausgesetzt.

Es fragte sich also zunächst, welcher Belastung einer bestimmten Stäbchenform jene stärkste nicht versehrende Formänderung, die Elasticitätsgrenze des natürlichen Zustandes, entspreche. Der Beginn der elastischen Nachwirkung ist aus den obigen Versuchen schon ersichtlich. Doch ist zu ermitteln, welche Belastung für ein gewisses Stäbchen den Beginn des Rückstandes bewirke. Nicht am Beginn der elastischen Nachwirkung ist die Elasticitätsgrenze zu suchen, sondern sie ist ausgedrückt durch jene Belastung, deren geringste Steigerung einen Rückstand veranlasst.

Diese Elasticitätsgrenze des natürlichen Zustandes ist bei dem Knochen ausnehmend schwer zu bestimmen, und zwar aus dem Grunde, weil die elastische Nachwirkung sowohl an frischen wie trocknen Stäbchen ein beträchtliches Feld einnimmt, das schon frühzeitig langsam durchmessen wird.

Grössere Belastungen erschweren die Beobachtung auch noch aus einem andern Grunde, der insbesondere in das Gewicht fällt für die Bestimmung der Proportionalität bei grösseren Formänderungen. Ich sehe dabei ganz ab von dem Umstande, dass der gesteigerte Druck des Stäbchens auf seine Stützpunkte sein Gleiten auf diesen erschweren wird. Von einer gewissen Belastungsgrösse ab schliesst sich aber der rasch erfolgenden primären Senkung eine zwar langsamer verlaufende secundäre Senkung des Stäbchens so unmittelbar an,

dass an eine Sonderung beider nicht mehr zu denken ist, selbst wenn die Belastung nur möglichst kurz gedauert hatte. Der Name secundäre Senkung ist aus dem Grunde der Bezeichnung »elastische Nachwirkung« vorgezogen, weil in jener ein Rückstandstheil enthalten sein kann, was mit dem Ausdruck elastische Nachwirkung nicht bezeichnet werden wollte.

Auf die Wirkung einer Belastung ist deren Dauer von grossem Einfluss. Dauernde Belastung äussert ihre Wirkungen durch über Stunden und Tage hinaus sich fortsetzende Biegungen. Umgekehrt ist auch die rückgängige Bewegung nach erfolgter Entlastung sehr schleppend und über Stunden und Tage bemerkbar. Der Bruch der Stäbchen erfolgt bei lange dauernder Belastung der Stäbchen weit unter der gewöhnlichen Belastung, vielleicht aber bei ähnlichen Durchbiegungen. Die Zeit wirkt hierin wie Verstärkung der Belastung.

Unvermeidlich sind zumal bei länger dauernder Belastung zahlreiche Erschütterungen, die ein belastetes Stäbchen treffen. Der Beobachtende selbst ist eine Quelle solcher. Selbst eine kleine Erschütterung macht sich durch sofortige Senkung des Fühlhebels kenntlich; die Senkung fällt um so beträchtlicher aus, je grösser die vorhandene Belastung ist und kann mehrere Millimeter am Massstab betragen.

So ungünstig und störend solche Erschütterungen während der Belastung sind, so sehr beschleunigend wirken sie auf den Verlauf der elastischen Nachwirkung[1]).

Die erste Reihe der jetzt anzuführenden Versuche ist, wie früher, mit möglichst kurzdauernder, mehr oder minder lang unterbrochener Belastung ausgeführt. Die Zeit, welche der Thätigkeit der elastischen Nachwirkung gelassen war, ist für die einzelnen Fälle nicht angegeben worden; bei grösseren Belastungen betrug sie bis zu mehreren Stunden.

Die zweite Reihe der Versuche ist dazu bestimmt, den Einfluss der Dauer der Belastung auf die Durchbiegung zu zeigen.

Die Biegungen sind ausgeführt bei einer Temperatur, die zwischen 15 und 25° C. bei den einzelnen Versuchen schwankte.

Kurzdauernde unterbrochene Belastung.

a) Trockne Stäbchen.

Versuch 64) Oberschenkelbein eines Mannes von mittlerem Alter.
Länge des Stäbchens 80, Breite $\frac{60}{30}$, Dicke $\frac{60}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs für 100 Gramm.
50	6	—	6	—	6 | 11
100	11	—	11	—	5 /
150	17	—	17	—	6 | 12
200	23	—	23	—	6 /
300	34	—	34	0,5	11
400	45	—	45	0,5	11
500	56,5	—	56,5	0,5	11,5

1) Sogar die von einem gespielten Klavier ausgehenden Erschütterungen machten sich nach beiden Richtungen hin geltend. Wer sollte hier nicht in einem gewissen Sinne der Wirkungen der Musik auf uns selbst gedenken!

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs für 100 Gramm.
600	67	—	67	0,5	11,5
700	78,5	—	78,5	1	11,5
800	90,5	0,5	90	1	11,5
900	102	0,5	101,5	1	11,5
1000	114	0,5	113,5	1,5	12
1200	139	0,5	138,5	1,5	12,5
1400	166	1,5	164,5	2	13
1600	—	—	—	—	—
1800	—	—	—	—	—
2000	—	—	—	—	—
2100	450 Bruch des Stäbchens in 4 Stücke.			—	—

Elasticitätsmodul = 2168

Versuch 65) Oberarmbein eines 30jährigen Mannes. S. Vers. 12.
Länge des Stäbchens 80, Breite $\frac{52}{30}$, Dicke $\frac{54}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs
200	41	—	41	—	41
400	82	—	82	0,5	41
600	124	—	124	0,5	42
800	176	0,5	175,5	1	51,5
1000	—	—	—	—	—
1200	—	—	—	—	—
1250	Bruch				

Elasticitätsmodul = 1961

Versuch 66) Oberschenkelbein eines 70jährigen Mannes.
Länge des Stäbchens 80, Breite $\frac{54}{30}$, Dicke $\frac{58}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs
200	31	—	31	—	31
400	62	—	62	—	31
600	92	—	92	0,5	30
800	124,5	0,5	124	1	32
1000	157,5	1,5	156	1,5	32
1200	—	—	—	—	—
1400	—	—	—	—	—
1550	Bruch				

Elasticitätsmodul = 2327

Versuch 67) Ein zweites Stäbchen desselben Oberschenkelbeins.
Länge 80, Breite $\frac{55}{30}$, Dicke $\frac{54}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs
200	33	—	33	—	33
400	66	—	66	0,5	33
600	99	—	99	0,5	33
800	133,5	0,5	133	0,5	34
1000	168	2	166	1	33
1200	—	—	—	—	—
1350	Bruch				

Elasticitätsmodul = 2327

Versuch 68) Ein drittes Stäbchen desselben Oberschenkelbeins. S. Vers. 10.
Länge 80, Breite $\frac{24}{30}$, Dicke $\frac{18}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs
200	27	—	27	—	27
400	54	—	54	0,5	27
600	80,5	0,5	80	1	26
800	108	1	107	1	27
1000	135	1	134	1	27
1200	166,5	2,5	164	2	30
1400	—	—	—	—	—
1500	Bruch				

Elasticitätsmodul = 2364

Versuch 69) Oberschenkelbein eines 46jährigen Mannes. S. Vers. 54.
Länge des Stäbchens 80, Breite $\frac{27}{30}$, Dicke $\frac{52}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs
200	19	—	19	—	19
400	38,5	—	38,5	0,5	19,5
600	58,5	—	58,5	0,5	20
800	80,5	1	79,5	0,5	21
1000	102	2	100	1	20,5
1400	150,5	2,5	148	1,5	24
1800	—	—	—	—	—
2000	—	—	—	—	—
2050	280 Bruch				

Elasticitätsmodul = 2560

Versuch 70) Oberschenkelbein des Rindes. S. Vers. 58.
Länge des Stäbchens 80, Breite $\frac{110}{30}$, Dicke $\frac{55}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs
200	14	—	14	—	14
400	28	—	28	0.5	14
600	42	—	42	0,5	14
800	56	—	56	0,5	14
1000	70,5	0,5	70	1	14
1400	103	1	102	1	16
1800	138	2	136	2,5	17
2000	—	—	—	—	—
2400	—	—	—	—	—
2600	Bruch				

Elasticitätsmodul = 2619

b) Frische, feuchterhaltene Stäbchen, bei einer Temperatur von 15—25° C.

Versuch 71) Schienbein eines 46jährigen Mannes. S. Vers. 22.
Länge 80, Breite $\frac{25}{30}$, Dicke $\frac{53}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs
200	19	—	19	—	19
400	38,5	—	38,5	0,5	19,5
600	57,5	—	57,5	0,5	19

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs
800	76	0,5	75,5	0,5	18
1000	94,5	0,5	94	1	18,5
1400	132,5	1,5	131	1,5	18,5
1600	—	—	—	—	—
1800	—	—	—	—	—
2000	—	—	—	—	—
2100	360 Bruch				

Elasticitätsmodul = 2469

Versuch 72) Ein zweites Stäbchen von demselben Schienbein.
Länge 80, Breite $\frac{110}{30}$, Dicke $\frac{55}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs
200	15	—	15	—	15
400	30,5	—	30,5	0,5	15,5
600	46	—	46	0,5	15,5
800	61	—	61	0,5	15
1000	76,5	0,5	76	1	15
1200	93,5	0,5	93	1	17
1400	110	1	109	1,5	16
1600	128,5	1,5	127	1,5	18
1800	148	2	146	2	19
2000	—	—	—	—	—
2200	299 Bruch				

Elasticitätsmodul = 2339

Versuch 73) Oberschenkelbein desselben Mannes. S. Vers. 38.
Länge des Stäbchens 80, Breite $\frac{105}{30}$, Dicke $\frac{53}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs
200	17,5	—	17,5	—	17,5
400	34,5	—	34,5	—	17
600	52	—	52	—	17,5
800	69	—	69	0,5	17
1000	87,5	0,5	87	0,5	18
1400	126,5	1,5	125	1,5	19
1600	—	—	—	—	—
1700	—	—	—	—	—
1800	288 Bruch				

Elasticitätsmodul = 2424

c) Frische feuchterhaltene Stäbchen, bei einer Temperatur von 38° C.

Versuch 74) Schienbein eines 46jährigen Mannes. S. Vers. 60
Länge 80, Breite $\frac{82}{30}$, Dicke $\frac{45}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs
200	43	—	43	—	43
400	86	—	86	0,5	43
600	131,5	1,5	130	1	44
800	—	—	—	—	—
900	369 Bruch				

Elasticitätsmodul = 2041

Versuch 75) Schienbein desselben Mannes. S. Vers. 61.
Länge des Stäbchens 80, Breite $\frac{98}{30}$, Dicke $\frac{58}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs
200	19	—	19	—	19
400	38	—	38	0,5	19
600	56	—	56	0,5	18
800	75,5	0,5	75	0,5	19
1000	93,5	0,5	93	1	18
1200	114,5	1,5	113	2	20
1400	—	—	—	—	—
1600	—	—	—	—	—
1800	336 Bruch				

Elasticitätsmodul = 1871

Versuch 76) Oberschenkelbein desselben Mannes. S. Vers. 62.
Länge des Stäbchens 80. Breite $\frac{106}{30}$, Dicke $\frac{55}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs
200	18	—	18	—	18
400	36,5	—	36,5	0,5	18,5
600	54,5	—	54,5	0,5	18
800	73	0,5	72,5	0,5	18
1000	91,5	1	90,5	1	18,5
1400	130,5	2	128,5	2	19
1600	—	—	—	—	—
1800	348 Bruch				

Elasticitätsmodul = 1982

Versuch 77) Oberschenkelbein desselben Mannes.
Länge des Stäbchens 80, Breite $\frac{106}{30}$, Dicke $\frac{51}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs für 200 Gramm.
200	22	—	22	—	22
1000	110	0,5	109,5	1	21,9

Elasticitätsmodul = 2093

Versuch 78) Dasselbe Stäbchen, 180° um seine Längenaxe gedreht.

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs für 200 Gramm.
200	22	—	22	—	22
1000	112	2	110	1,5	22
1500	—	—	—	—	—
1600	Bruch				

Versuch 79) Oberschenkelbein desselben Mannes.
Länge 80, Breite $\frac{108}{30}$, Dicke $\frac{58}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs für 200 Gramm.
200	15	—	15	—	15
1000	75,5	0,5	75	1	15
1000	75,5	0,5	75	1,5	15
1000	76,5	1	75	2	15
—	—	—	—	—	—
2200	Bruch				

Elasticitätsmodul = 2099

Versuch 80) Oberschenkelbein des Rindes. S. Vers. 63.
Länge des Stäbchens 80, Breite $\frac{104}{30}$, Dicke $\frac{54}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs für 200 Gramm.
200	16	—	16	—	16
400	32	—	32	0,5	16
600	47,5	—	47,5	0,5	15,5
800	64	0,5	63,5	0,5	16
1000	80,5	1	79,5	1	16
1400	97	1	96	1,5	16,5
1600	—	—	—	—	—
1800	—	—	—	—	—
2000	274 Bruch				

Elasticitätsmodul = 2532

Versuch 81) Zweites Stäbchen desselben Oberschenkelbeins.
Länge 80, Breite $\frac{108}{30}$, Dicke $\frac{55}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	El. Biegungszuwachs für 200 Gramm.
200	16	—	16	—	16
1000	80,5	0,5	80	1	16
1000	80,5	0,5	80	1	16
1000	81	1	80	2	16
1000	—	—	—	—	—
2100	Bruch				

Elasticitätsmodul = 2302

Langdauernde Belastung.

Versuch 82) Oberarmbein eines Mannes.
Trocknes Stäbchen, Länge 80, Breite $\frac{55}{30}$, Dicke $\frac{55}{30}$ Mm.

Belastung	Belastungsdauer	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	Dauer derselben
100	$\frac{1}{2}$ Minute	16	—	16	—	—
100	48 Stunden	19	0,5	18,5	2	48 Stunden

Versuch 83) Oberschenkelbein eines Mannes.
Trocknes Stäbchen, Länge 80, Breite $\frac{62}{30}$, Dicke $\frac{63}{30}$ Mm.

Belastung	Belastungsdauer	Totalbiegung	Rückstand	El. Biegung	El. Nachwirkung	Dauer derselben
1000	$\frac{1}{2}$ Minute	102	—	102	0,5	5 Minuten
1000	24 Stunden	127	7	120	19	24 Stunden

Versuch 84) Oberschenkelbein eines Mannes.
Trocknes Stäbchen, Länge 80, Breite $\frac{60}{30}$, Dicke $\frac{58}{30}$ Mm.
Eine Vermehrung der Belastung fand erst nach je 24stündiger Einwirkung der vorhergehenden Belastung statt.

Belastung	Totalbiegung		Biegungszuwachs sofortiger	Biegungszuwachs vollständiger (durch die Dauer der Belastung bewirkter)
100	14	15	14	15
200	27,5	31	13,5	16
300	40,5	49	13	18
400	54,5	67,5	14	18,5

Belastung	Totalbiegung		Biegungszuwachs sofortiger	vollständiger
500	68	86	13,5	18,5
600	82	117	14	31
700	96	136	14	19
800	109	157	13	21
900	122	183	13	26
1000	135	222	13	39
1100	148	—	13	—

zerbrach während der Nacht.

Versuch 85) Oberschenkelbein desselben Mannes.
Länge 80, Breite $\frac{58}{30}$, Dicke $\frac{56}{30}$ Mm.

Belastung	Totalbiegung		Biegungszuwachs sofortiger	vollständiger
100	12	13,5	12	13,5
200	24	27,5	12	14
300	36	42,5	12	15
400	48	58	12	15,5
500	60	73,5	12	15,5
600	72	89	12	15,5
700	84	106,5	12	17,5
800	96	124,5	12	18
900	107	142,5	11	18
1000	119	165,5	12	20
1100	131	182,5	12	20
1200	143	204,5	12	22
1300	154	—	11	—

zerbrach während der Nacht.

Biegungsfestigkeit.

Die im Vorausgehenden enthaltenen, am Ende der einzelnen Versuchsreihen befindlichen Werthe der Biegungsfestigkeit finden sich auf folgender Tabelle zusammengestellt. Einige andere, gleichfalls die Biegungsfestigkeit betreffenden Werthe sind den ersten hinzugefügt. Hierzu kommt, dass dieselben um eine Vergleichung zu ermöglichen, auf einen gemeinsamen Querschnitt umgerechnet wurden; die Längen der gebrochenen Stäbchen waren ohnediess in allen Fällen gleich gewesen. Als gemeinsamer Querschnitt wurden 2 Millimeter Breite und 2 Millimeter Höhe angenommen[1]).

1) Die Gewichte, welche zwei gleichartige Parallelepipede brechen, verhalten sich wie die Producte aus den Querschnittsflächen in die Höhen und verkehrt wie die Längen derselben.

Gegenstand	Herkunft	30 fache Breite	u. Dicke	Biegungsfestigkeit in Grammen	32 fache Biegung	reducirte Biegungsfestigkeit	
Oberarmbein	30jähr. Mann	52	54	1250		1780	Trockne Stäbchen, bei 15—25° C.
»	» »	57	57	1320		1539	
Oberschenkelbein	? »	95	94	8650		2226	
»	» »	60	60	2100 (zersprang in 4 Stücke)	450 Mm.	2100	
»	70jähr. »	94	48	1500		1481	
»	» »	54	58	1550		1843	
»	» »	55	54	1350		1818	
»	46jähr. »	97	52	2050	280	1683	
»	» »	50	103	1000		407[1]	
»	» »	58	108	4900 (3 Stücke)		1570	
»	» »	50	95	2200		1053	
»	» »	105	53	1800	288	1318	Frische Stäbchen, bei 15—25° C.
Schienbein	» »	95	53	2100	360	1688	
»	» »	110	55	2200	299	1428	
»	» »	82	45	900	369	1170	Frische Stäbchen, bei 38° C.
»	» »	98	58	1800	336	1479	
Oberschenkelbein	» »	106	55	1800	348	1212	
»	» »	106	51	1600		1253	
»	» »	108	58	2200		1300	
»	? »	60	58	1100		1177	Trockne Stäbchen, bei lang dauernder Belastung
»	» »	58	56	1300		1544	
»	Rind	55	58	1600		1868	Trockne Stäbchen, bei 15—25° C.
»	»	62	61	1850		1732	
»	»	60	60	1815		1815	
»	»	108	55	2600		1719	
»	»	104	54	2000	274	1424	Frische Stäbchen, bei 38° C.
»	»	110	55	2100		1388	
»	»	110	60	2600		1418	
»	»	106	56	2400		1559	
»	»	109	55	2400		1564	
»	»	45	110	2800		1110	
»	»	47	110	3250 (3 Stücke)		1234	

Beurtheilung der Biegungsergebnisse.

Die Grösse der Durchbiegung eines in der Mitte belasteten Stäbchens ist eine Function von mehreren Argumenten. Sie war zu untersuchen in ihrer Abhängigkeit von den Dimensionen der Länge, Breite und Dicke; von den Richtungen der Belastung in Bezug auf die Knochenaxen; von der Art und Herkunft der Knochen; von der Herstellung der Stäbchen aus oberflächlichen und tiefen Schichten der Compacta; von dem Feuchtigkeitszustande, von der Grösse der Belastung und von der Dauer derselben; von der Wärme.

Es ergibt sich, dass, was den Einfluss der Dimensionen betrifft, die Biegung des Knochens eine sehr starke Annäherung an die theoretisch abgeleiteten Biegungsgesetze regelmässiger Körper in sehr vielen Fällen hervortreten lässt. In einer andern Reihe von Fällen ist diese Uebereinstimmung der Rechnung mit der Beobachtung geringer und theilweise derartig, dass dieser Mangel nicht mehr innerhalb der Genauigkeitsgrenzen gesucht, sondern seine Erklärung nur in der ungleichmässigen Structur einiger Stäbchen gefunden werden kann. Im Ganzen aber zeigt sich auch die Biegung des Knochens direct proportional dem Kubus der Länge, indirect proportional der Breite, indirect proportional dem Kubus der Dicke.

1) Das Stäbchen war ohne sichtbaren Fehler gewesen.

Besonderes Interesse musste es bieten, zuzusehen, ob die Durchbiegungen der Stäbchen ihren Belastungen proportional seien oder nicht. Ueberblickt man die Reihen der Versuche, so zeigt sich, dass die elastische Biegung nur innerhalb einer gewissen Breite der Formänderung des Stäbchens proportional der Belastung wachse. Das Alterniren einer geringeren Zahl mit einer höheren ist zwar sehr häufig zu bemerken; doch gleichen sich diese Unregelmässigkeiten überall wo sié vorkommen gegenseitig vollständig oder doch in hohem Grade aus.

Die Grösse der Formänderung, bis zu deren Erreichung jene Proportionalität stattfindet, schwankt im Uebrigen so sehr, dass es unmöglich ist sie genauer zu bezeichnen als damit, dass sie häufig noch jenseits der Elasticitätsgrenze liege. Eine weit grössere Reihe von hierauf gerichteten Versuchen als die zu diesem Zweck mitgetheilten lässt eine genauere Bestimmung in Folge noch unregelmässigeren Verlaufes ebensowenig zu; sie wurden darum nicht mitgetheilt.

Auf diese proportional mit der Belastung wachsende Strecke folgt hierauf, deutlich wahrnehmbar an den im feuchten Zustand sowie an den mit langdauernder Belastung gebogenen Stäbchen, eine solche, innerhalb welcher dem gleichen Belastungszuwuchs ein geringerer Biegungszuwuchs entspricht. Diess Verhalten kann bis zum Bruch des Stäbchens unverändert das gleiche bleiben; in anderen Fällen steigen die Biegungszuwüchse gegenüber den Belastungszuwüchsen, in geringerer oder grösserer Entfernung vom Bruch, theils bei den frischen, insbesondere aber bei den trocknen Stäbchen und unterbrochener Belastung. Bei lange dauernder Belastung der letzteren bleiben dagegen die kleineren Belastungszuwüchse bis zum Ende bestehen.

Bedenkt man nun noch, dass bei unterbrochener Belastung höhere Gewichte eine mehr und mehr sich verwischende untere Grenze der Biegung hervorrufen, so wird man geneigt sein, das letztere Verhalten, nach welchem jenseits der Proportionalitätsgrenze gleichen Belastungszuwüchsen geringere Biegungszuwüchse bis zum Ende entsprechen, für das normale zu erklären, das entgegengesetzte Verhalten aber theils der Schwierigkeit der Messung, theils Unregelmässigkeiten der Stäbchen zuzuschreiben.

Weit auffallender ist die Verminderung der Dehnungszuwüchse bei fortschreitender Dehnung des Knochenknorpels. Sie beginnt schon sehr frühe, nimmt allmälig zu und bleibt über eine lange Strecke hin stationär bis zur Zerreissung. In viel geringerem Grade vermindern sich die Dehnungen des Rippenknorpels durch gleichmässig fortschreitende Belastung; relativ später bleiben hier die Dehnungen gleichgross bis zur Zerreissung.

Trägt man die Gewichte als Abscissen, die Biegungen und Dehnungen als Ordinaten auf und verbindet die Endpunkte der letzteren durch eine Linie, so bildet dieselbe in allen Fällen anfänglich eine Gerade, die darauf in eine Curve von geringerer Steigung als die Gerade sich fortsetzt. Bei den zwei Knorpelarten, wahrscheinlich auch beim Knochen endigt die Curve ohne Aenderung dieser Richtung.

Die Verschiedenheit der Druckrichtung, die nur nach 2 aufeinander senkrechten Richtungen untersucht werden konnte, war von keinem gleichsinnigen Einfluss auf die Grösse der Biegung, wenngleich ein Einfluss öfter hervortrat.

Eine Zusammenstellung der Elasticitätsmoduli nach der Verschiedenheit der Stäbchensorten bekundet die Abhängigkeit der Durchbiegung von den übrigen oben berührten Qualitäten in folgender Weise.

Elasticitätsmodul menschlicher Knochen.

Gegenstand	Herkunft	Elasticitätsmodul	
Oberarmbein	30jähr. Mann	1961 $\frac{\text{Kgr.}}{\square\text{Mm.}}$	Trockner Knochen, bei 15—25° C.
»	» »	2315	
Oberschenkelbein	? »	2433	
»	» »	2098	
»	46jähr. »	2560	
»	» »	2311	
»	» »	2065	
»	70jähr. »	2364	
»	» »	2195	
»	» »	2327	
»	46jähr. »	2137	Frischer Knochen, bei 15—25° C.
»	» »	2081	
»	» »	2339	
»	» »	2424	
»	» »	2213	
»	» »	1891	
Schienbein	» »	2323 und 2045	
»	» »	2469 und 2372	
»	» »	2000	
»	» »	bei 10° / bei 38°	Frischer Knochen, bei verschiedener Temperatur
»	» »	2337 / 2041	
»	» »	1983 / 1871	
Oberschenkelbein	» »	2213 / 1982	
»	» »	— / 2093	
»	» »	— / 2099	
		des frischen / des trocknen	
»	» »	2137 / 2560	Frischer und trockner Knochen
»	» »	2081 / 2311	
»	» »	1891 / 2065	

Knochen des Rindes.

Oberschenkelbein	trocken	2619	2495
»	frisch	2590	
»	frisch bei 10° C.	2794	2302
»	» » 38° C.	2532	

Ueber die Lage der Elasticitätsgrenze des Knochens orientirt folgende Zusammenstellung des Verhältnisses zwischen der die Elasticitätsgrenze erreichenden und den Bruch herbeiführenden Belastung.

Gegenstand	Herkunft	Belastung an der Elasticitäts-grenze in Grammen	Bruchgewicht in Grammen	
Stäbchen vom Oberarmbein	30jähr. Mann	600	1200	Trockne Stäbchen. bei 15—25° C.
»	» »	600	1320	
Oberschenkelbein	? »	700	2100	
»	70jähr. »	600	1550	
»	» »	600	1350	
»	» »	400	1500	
»	46jähr. »	600	2050	
Schienbein	» »	600	2100	Frische Stäbchen. bei 15—25° C.
»	» »	800	2200	
Oberschenkelbein	» »	800	1800	
»	» »	600	1800	Frische Stäbchen, bei 38° C.
Schienbein	» »	400	900	
»	» »	600	1800	
Oberschenkelbein	Rind	600	1600	Trockne Stäbchen, bei 15—25° C.
»	»	600	1850	
»	»	800	2600	
»	»	600	2000	Frisches Stäbchen, bei 38° C.

Die Elasticitätsgrenze des Knochens liegt demnach bei den verschiedenen Stäbchensorten innerhalb des ersten und zweiten Viertels seiner Festigkeit.

Die Elasticität sowohl als auch die Festigkeit des trocknen Knochens hat sich grösser gezeigt als die des frischen, zumal des warmen Knochens; dessen Elasticität aber erscheint wiederum als die vollkommnere, insofern er grössere Formveränderungen ohne Nachtheil erleidet. Ein anderes Moment von günstiger Wirkung findet sich noch am ruhenden, blutdurchströmten Knochen, nämlich die Erschütterungen und capillaren Reibungen des Knochens durch den Blutstrom; sie sind von Bedeutung für die Beschleunigung des Verlaufes der elastischen Nachwirkung.

Die durch Biegungsversuche erhaltenen Werthe des Elasticitätsmodul lassen eine schöne Uebereinstimmung erkennen mit den von Wertheim durch Tensionsversuche gefundenen. Während aber die Bestimmung des Elasticitätsmodul durch Biegungsversuche den Bestimmungen desselben durch directe Ausdehnungs- und Zusammendrückungsversuche theoretisch parallel läuft und unter gewissen Voraussetzungen selbst genauere Ergebnisse zu liefern vermag, ist es ein Anderes hinsichtlich der Bestimmung des Festigkeitsmodul. Wiewohl die Biegung immer nur einen einzigen Werth zu erzielen vermag, so wird, da der Elasticitätsmodul für Druck dem für Zug innerhalb der Elasticitätsgrenze auch beim Knochen gleich ist, der Elasticitätsmodul der Biegung, die Zug und Druck miteinander verbindet, mit dem durch directen Zug und Druck bestimmten Werthe übereinstimmen müssen. Die Festigkeiten gegen Zug und Druck können dagegen sehr weit auseinandergehen, wovon das Gusseisen ein auffallendes Beispiel liefert; der durch Biegung hervorgebrachte Bruch dagegen gibt nur einen einzigen Werth an. Ueber die Festigkeit gegen Zug und Druck vermögen darum Biegungsversuche nichts auszusagen, sondern sie stellen einen combinirten Werth auf, den Festigkeitsmodul der Biegung[1]).

1) Berechnet man aus obigen Versuchen, unter der Voraussetzung der Constanz des Elasticitätsmodul sowie seiner Gleichheit für Zug und Druck auch bei höheren Spannungen, den Festigkeitsmodul der Biegung

Tabelle der Elasticitätsmodul verschiedener Körper.

Anorganische Körper.		Organische Körper.	
Gegenstand	Elasticitätsmodul	Gegenstand	Elasticitätsmodul
Gussstahl	29200 $\frac{\text{Kgr.}}{\square\text{Mm.}}$	Knochen	1871—2794
Schmiedeeisen	19700	Knochenknorpel	3,888—5,833
Gusseisen	10000	Rippenknorpel	0,875—1,071
Platin	16000	Sehne	166,93
Kupfer (gehämmert)	11000	Nerv	10,905
Gold	8000	Muskel	0,273—1,271
Silber	7300	Arterie	0,0726
Bronce	6900	Vene	0,844
Messing	6400	Lederriemen	7,3
Zinn	4000	Holz (parallel der Faser	1100
Blei	500	Holz in radialer Richtung	130

Schub- und Torsionsfestigkeit.

Die Bestimmung der Schubfestigkeit der Knochensubstanz wurde besonders aus dem Grunde unternommen, weil die Biegung derselben nur nach 2 Richtungen hatte ausgeführt werden können, die dritte Richtung aber, die den Faserverlauf parallel trifft, grosse Differenzen erwarten liess. Die Länge der in radialer Richtung aus compacter Substanz der Röhrenknochen herstellbaren Stäbchen war aber hinreichend, um dieselben auf der Schubfestigkeit zu prüfen.

Schon bei Gelegenheit der Untersuchung der rückwirkenden Festigkeit hatte sich gezeigt, dass verschiedene Druckrichtung, ob parallel, ob senkrecht zur Längenaxe, zu verschiedenem Ergebniss gelange. Der Unterschied ist noch auffallender bei der Schubfestigkeit; wirkt die schiebende Kraft parallel der Faser, strebt also eine äussere Kraft an einem Radialstäbchen einen Complex Haversischer Säulen in ihrer Längenrichtung von ihrer Umgebung loszuschieben, abzuscheeren, so widersteht der Knochen nur in auffallend geringem Grade. Wären die auf Biegung beanspruchten Röhrenknochen massiv construirt, mit einem Querschnitt, der dieselbe Kraftleistung ermöglichte, so würden Verschiebungen parallel der neutralen Faserschicht, in welcher die Schubspannung ihren höchsten Werth erreicht, weit früher die Integrität des Knochens gefährden, als es bei hohlcylindrischen Knochenformen geschehen wird.

---

nach der Formel $\frac{Pl}{4} = \frac{bh^2}{6} \cdot B$, in welcher P die Last, bhl die Dimensionen des Parallelepipedes, B den Biegungs-Festigkeitsmodul der Substanz bezeichnet, so fallen die Werthe für B zu gross aus und übertreffen selbst den Festigkeitsmodul für Druck. Es ist aber jene Voraussetzung der Gleichheit der Elasticitätsmodul für Druck und Zug bei höheren Spannungen beim Knochen als nicht erfüllt zu betrachten.

Zur Messung der Schubfestigkeit wurden Stäbchen von quadratischem Querschnitt von 2 Mm. Seite die einen nach der Längen- die andern nach der Radialrichtung aus der Compacta gefertigt und in der Art eines Nietbolzens in Anspruch genommen.

Eine quadratisch durchbohrte eiserne Mittelplatte von 2 Mm. Dicke ward zwischen zwei ebenso dicke, in gleicher Weise durchbrochene Deckplatten, welche 2 Mm. von einander abstehen und mit ihren obern Enden bogenförmig in einander übergehen, so eingeschoben, dass die Ränder der 3 Durchbohrungen in einer Flucht lagen, um das zu untersuchende Knochenstäbchen aufzunehmen. An diesem kleinen Apparat greift oben und unten, an den Deckplatten und der Mittelplatte, je eine Kette mit Haken an, von welchen die obere an einem Träger hängt, die untere eine Wagschale oder einen Hebelarm aufnimmt und durch die Mittelplatte den sie durchbohrenden Stäbchentheil von den hart daneben gelegenen durch die Deckplatten gestützten Stäbchentheilen abzuscheeren sucht.

Dieselbe Vorrichtung, nur mit grösseren Durchbohrungen versehen, diente zur Bestimmung der Schubfestigkeit der Spongiosa und des Knorpels.

Temperatur während der Versuchszeit 21° C.

Versuche an der Compacta.

1) Oberschenkelbein eines 30jährigen Mannes.
Frische Stäbchen, parallel der Längenaxe des Knochens geschnitten, quadratischer Querschnitt von 2 Mm. Seite. Druckrichtung senkrecht zum Faserverlauf.
5 Versuche. Die Abscheerung erfolgte durch die Belastungen mit
90 98 84 98 und 104 Kilogramm.
Mittelwerth 94,8 »

2) Frische Stäbchen von demselben Oberschenkelbein, in Querrichtung (Sehnenrichtung) aus der Compacta geschnitten. Quadratischer Querschnitt von 2 Mm. Seite. Druckrichtung parallel der Faser.
6 Versuche. Die Abscheerung erfolgte durch die Belastungen mit
36 52 36 41 42,5 und 34 Kilogramm.
Mittelwerth 40,25 »

Versuche an der Spongiosa.

3) Spongiosa des Schienbeinkopfes.
Frische Stäbchen, parallel der Längenaxe des Knochens geschnitten. Quadratischer Querschnitt von 4 Mm. Seite. Druckrichtung senkrecht zur Längenaxe des Knochens.
6 Versuche. Die Abscheerung erfolgte durch die Belastungen mit
17,5 20 14,5 15 18 17,5 Kilogramm.
Mittelwerth 17 »

4) Frische Stäbchen von demselben Knochen, in Querrichtung aus der Spongiosa geschnitten. Quadratischer Querschnitt von 4 Mm. Seite. Druckrichtung parallel der Längenaxe des Schienbeins.
5 Versuche. Die Abscheerung erfolgte durch die Belastungen mit
6 9,5 5 5,5 4,5 Kilogramm.
Mittelwerth 6,1 »

Menschlicher Rippenknorpel.
Quadratischer Querschnitt von 4 Mm. Seite.
9 Versuche. Die Abscheerung erfolgte durch die Belastungen mit
17,5 17,5 9 7,5 9 8 11 9,5 11 Kilogramm.
Mittelwerth 11,1 »

Da der Widerstand der Abscheerung der Grösse der Trennungsfläche proportional ist, so ist auf die Trennungsfläche von 1 □Mm. bezogen und in Kilogrammen ausgedrückt der Festigkeitsmodul der Abscheerung

der Compacta, Druckrichtung senkrecht zur Faser = 11,85
» parallel » » = 5,03
der untersuchten Spongiosa, » senkrecht » » = 0,56
» parallel » » = 0,2
des Rippenknorpels . . . . . = 0,34

Zu Torsionsversuchen wurden Knochenstäbchen benutzt, die in einer Länge von 80 Mm. zwischen beiden Enden sorgfältig waren abgerundet worden. Die beiden Enden behielten quadratischen Querschnitt und dienten zur Einklemmung. Diese geschah innerhalb zweier Metallhülsen, deren eine in horizontaler Richtung in eine feststehende Säule, die andere in gleicher Höhe in das Centrum des einen Endes eines horizontal liegenden Holzcylinders eingelassen ist, welcher auf 2 passenden Lagern drehbar aufruht. Der Cylinder bildet die Axe einer leichten hölzernen Kreisscheibe von 10 Cm. Radius, die sich in der Mitte des Abstandes der beiden Lager befindet. Die Ränder beider Seitenflächen der Scheibe sind ringsum überragt von einer feinen Leiste, die bewirkt, dass ein starker auf der Peripherie befestigter Seidenfaden nicht abgleiten kann. Die äussere Seitenfläche besitzt eine genaue Gradeintheilung, an welcher ein unbeweglicher auf dem äusseren Axenlager befestigter Zeiger sich aufrichtet. Das freie Ende des Seidenfadens trägt eine Wagschale von 4 Gramm Gewicht. Das Gewicht eines Stückchens Seidenfaden von 2 Decimeter Länge (= 0,2 Gramm), am Umkreis der Scheibe wirkend, genügt zur Ueberwindung des Reibungswiderstandes.

Es sollen übrigens nur über die Drehungsfestigkeit einige Angaben gemacht und diese bezüglich ihrer Uebereinstimmung mit den vorher angegebenen Werthen über Schubfestigkeit verglichen werden.

Versuche am Knochen.

1) Frisches Stäbchen vom Oberschenkelbein eines 30jährigen Mannes.
Länge 80, Durchmesser $\frac{5\,8}{3\,0}$ Mm.
Die Zerdrehung erfolgte bei einer Belastung des Hebelarmes (von 100 Mm. Länge) mit 100 Gramm.

2) Frisches Stäbchen desselben Knochens. Länge 80, Durchmesser $\frac{5\,7}{3\,0}$ Mm.
Zerdrehung durch 125 Gramm Hebelbelastung.

3) Frisches Stäbchen desselben Knochens. Länge 80, Durchmesser $\frac{5\,8}{3\,0}$ Mm.
Zerdrehung durch 100 Gramm.

4) Frisches Stäbchen desselben Knochens. Länge 80, Durchmesser $\frac{5\,8}{3\,0}$ Mm.
Zerdrehung durch 110 Gramm.

Versuche am Knorpel.

5) Stäbchen vom menschlichen Rippenknorpel. Länge 40, Durchmesser 5 Mm. Zerdrehung durch 75 Gramm Hebelbelastung.

6) Desgleichen, Länge 40, Durchmesser 4 Mm. Zerdrehung durch 45 Gramm.

7) Desgleichen, Länge 40, Durchmesser 7 Mm. Zerdrehung durch 110 Gramm.

8) Desgleichen, Länge 40, Durchmesser 8 Mm. Zerdrehung durch 130 Gramm.

Berechnet man aus den vorstehenden Angaben den Modul der Torsionsfestigkeit[1]), so erhält man 1) für den Knochen in nach den Versuchen aufeinanderfolgenden Zahlen:

7,097 9,307 7,097 und 7,8,

im Mittel 7,9 $\frac{\text{Kgr.}}{\square\text{Mm.}}$

2) für den Rippenknorpel:

0,306 0,358 0,163 0,130,

im Mittel 0,239 $\frac{\text{Kgr.}}{\square\text{Mm.}}$

Anhang.

Der Knochen als Ganzes.

Wäre der Körper eines Wirbels völlig aus gleichartig gefügter Spongiosa zusammengesetzt und bildete diese Masse ein kurzes Prisma mit ebener, senkrecht zur Längenaxe begrenzter oberer und unterer Fläche, so würde seine Festigkeit gegenüber einer parallel zur Längenaxe wirkenden Gewalt leicht zu bestimmen sein. Sieht man natürlich ab von jeder Geschwindigkeit jener Gewalt und denkt sich dieselbe einfach als eine die ganze obere Fläche gleichmässig treffende Belastung, so ist die Festigkeit eines solchen Wirbelkörpers, da die rückwirkende Festigkeit proportional mit der Querschnittsfläche zunimmt, gegeben durch das Product des Festigkeitsmodul der Substanz mit der Querschnittsfläche. Ist jener

---

1) Bedeutet P die Last, l den Hebelarm derselben, d den Durchmesser des Stäbchens, T den Torsionsfestigkeitsmodul der Substanz, so ist $Pl = \frac{\pi d^3}{16} \cdot T$.

$= 0{,}84 \frac{\text{Kgr.}}{\square\text{Mm.}}$, diese $= 1500$ □Mm., so ist die den Bruch herbeiführende Belastung des Wirbelkörpers $= 1260$ Kilogramm.

Würde das Oberschenkelbein eines Erwachsenen in seinem Mittelstück auf absolute Festigkeit in Anspruch genommen sein und hat die Ringebene eines Querschnitts desselben 502,4 □Mm. Flächeninhalt, so ist, bei dem Zugfestigkeitsmodul der Substanz $= 11{,}16$, die zur Zerreissung nöthige Kraft $= 5607$ Kilogramm.

Wäre das Oberschenkelbein ein gerader, regelmässiger Hohlcylinder von demselben Querschnitt 502,4 □Mm., mit senkrecht zur Längenaxe begrenzten Endflächen, und wäre dieser Hohlcylinder in Säulenstellung auf seine rückwirkende Festigkeit in Anspruch genommen, in der Weise jedoch, dass eine seitliche Ausbiegung in Folge von Führungen nicht stattfinden kann, so ist, bei dem Druckfestigkeitsmodul 15,5, die zur Zermalmung nöthige Kraft $= 7787$ Kilogramm.

Legt man der Rechnung den Querschnitt des unteren Endes des Oberschenkelbeins und den Festigkeitsmodul seiner inneren Spongiosa bei, so gelangt man zu niedrigerem Werthe. Diess kann schon aus dem Grunde nicht auffallen, weil die Enden der Knochen nur geringen Biegungsspannungen ausgesetzt sind und geringerer Festigkeit bedurften.

Ruht dieselbe cylindrische Röhre, deren äusserer Radius 14, der innere Radius 6 Mm. beträgt, in Horizontalstellung mit beiden Enden auf 2 Trägern, die einen gegenseitigen Abstand von 40 Centimeter besitzen, und wirkt eine Kraft in der Mitte dieses Abstandes senkrecht auf die Längenaxe des Knochens[1]), so erfolgt der Bruch desselben durch die Belastung mit 383 Kilogramm.

Ragt dieselbe Röhre 20 Centimeter weit in Horizontalstellung über eine Unterlage hervor, welche die andere Hälfte festhält, so sind 383 Kilogramm, die das freie Ende ergreifen, ebenfalls hinreichend, den Bruch herbeizuführen. Der Bruchpunkt liegt hier an der Grenze des freien und festgehaltenen Röhrentheils, dort in der Mitte. Der vierte Theil dieser Last, $= 95{,}7$ Kilogramm, würde in beiden letzteren Fällen die Röhre nicht über die Elasticitätsgrenze hinaus spannen und damit ihre eigentliche Tragkraft in beiden Fällen bezeichnen. Dieselbe Belastung aber genügt zum Bruche, wenn die horizontalliegende Röhre an einem Ende festgehalten und in 40 Centimeter Entfernung am freien Ende durch sie ergriffen wird.

Einer besonderen Betrachtung bedarf der Fall, in welchem der knöcherne Hohlcylinder in Säulenstellung parallel zur Längenaxe belastet wird, eine seitliche Ausbiegung jedoch nicht ausgeschlossen ist. Zwar liegt theoretisch kein Grund vor, warum bei genau centraler Richtung der Last eine Ausbiegung erfolgen solle. Sie tritt aber erfahrungsgemäss immer ein, sobald die Länge einer Säule ihren Querdurchmesser an Ausdehnung vielmals

---

1) Bedeutet P die Belastung, l die Länge, r den äusseren, r' den inneren Radius der Hohlsäule, B den Biegungsfestigkeitsmodul der Substanz, so haben wir

$$\frac{Pl}{4} = \frac{\pi\,(r^4 - r'^4)}{4r} \cdot B.$$

übertrifft. Die theoretische Voraussetzung eben, dass die Kraftrichtung mathematisch genau mit der Säulenaxe zusammen falle, findet sich in Wirklichkeit niemals erfüllt. Eben so wenig ist das Material jemals von absoluter Homogenität, so dass die Schwerpunktsaxe der Säule nicht einmal eine gerade Linie bilden wird. Eine je grössere Länge nun eine Säule besitzt, um so leichter werden Abweichungen von jenen Voraussetzungen vorhanden sein und um so leichter Biegungen erfolgen müssen.

Bei zunehmender Länge einer Säule tritt sehr bald der Zustand ein, dass der Einfluss der Biegung auf die Festigkeit den der directen Compression übertrifft und die Säule in Folge der Biegung zerbricht, bevor noch die einfache Compressions-Spannung den Festigkeitsmodul der Substanz erreicht hat. In Folge dieser Biegung werden die Fasern der einen Hälfte gedrückt, die der andern gedehnt, eine neutrale Faserschicht in Bezug auf die geschehene Biegung hergestellt, wie bei jeder Biegung. Die stärkste Anstrengung der Fasern aber muss nothwendigerweise an der concaven Seite eintreten, indem hierselbst dem Compressionsdruck der Biegungsdruck sich hinzugesellt; auf der convexen Seite dagegen vermindert sich der Compressionsdruck um die Biegungsdehnung. Den hierbei geäusserten Widerstand der Säule nennt man darum die zusammengesetzt rückwirkende Festigkeit, die Festigkeit des Zerknickens, oder die Strebfestigkeit. Ueber diese wurden an längeren compacten Knochenstäbchen, auch an Stücken möglichst regelmässiger knöcherner Hohlsäulen mit dem früher genannten Hebel mehrere Versuche angestellt, die hier mitgetheilt werden sollen.

Versuche über die Strebfestigkeit der Knochen.

1) Frische Stäbchen vom Oberschenkelbein eines 33jährigen Mannes.
Quadratischer Querschnitt von 3 Mm. Seite. Länge oder Höhe der Säule = 45 Mm. Temperatur 38° C. Sieben Versuche. Der Bruch erfolgte durch die Belastungen mit
110 105 102 120 112 105 102 Kilogramm
Mittelwerth . . . . . 108 »

Aus denselben Stäbchen geschnittene Würfel, von 3 Mm. Kante, wurden bei derselben Druckrichtung zerdrückt durch die Belastungen mit
135 145 155 160 142 165 Kilogramm
Mittelwerth . . . . . = 150 »
Mittelwerth der Strebfestigkeit . . . . . = 108 »
Differenz . . . . . = 42 »
Die Stäbchen, welche die Würfel 15mal an Höhe übertrafen, trugen demnach $\frac{42}{150}$ d. i. annähernd $\frac{1}{4}$ weniger als die Würfel.

2) Würfel von 5 Mm. Kante, vom Schienbein des Rindes, trocken geworden, zerbrachen
bei einer Belastung mit . . . . . 426 Kilogramm
zwei derselben, auf einander gelegt . . . . . 371,5 »
» » in einem Stück . . . . . 401,5 »
drei » » » » . . . . . 379 »
Ein Parallelepiped von 70 Mm. Länge und dem Querschnitt der Würfel 306 »
14fache Länge alterirte die Widerstandskraft des Würfels also etwa um $\frac{1}{4}$ ihrer Grösse.

3) Wurde das ganze, in seinem Mittelstück schön cylindrische Oberschenkelbein der Katze in den Apparat eingestellt, so zersplitterte der Schenkelhals bei einer Belastung mit 142,5 Kilogramm.

Das cylindrische Mittelstück desselben Knochens der andern Seite, von 60 Mm. Länge, äusserem Radius $= \frac{75}{20}$, innerem Radius $= \frac{49}{29}$ Mm., mit senkrecht zur Längenaxe begrenzten Endflächen, zerbarst splitternd bei einer Belastung mit . . . . . 260 »

Ein 5 Mm. hoher Querabschnitt desselben Knochens der andern Seite, brach mit. . . . . 312,5 »

Zwölffache Länge verminderte demnach den Widerstand des 5 Mm. Hohlcylinders etwa um $\frac{1}{6}$.

4) Bei Einstellung des 44 Mm. langen Oberschenkelbeins eines Frosches in einen kleineren Druckapparat wurde der Schenkelkopf abgetrennt durch Belastung mit 9,5 Kilogramm.

Die Diaphyse desselben Knochens barst unter dem Druck von . . . 14 »

Das 46 Mm. lange Unterschenkelbein desselben Thieres brach unter dem Druck von . . . . . 14,5 »

Mit Belassung des Periostes und einiger Musculatur an dem Ober- und Unterschenkelbein desselben Thieres betrug die Strebfestigkeit . . . 9, 16 und 12,5 »

5) Die Diaphyse des Oberschenkelbeins eines neugebornen Menschen wurde der Quere nach in Stücke von 5 Mm. Höhe zerlegt. Die Prüfung der Widerstände ergab, wie erwartet, für die einzelnen Stücke annähernd gleiche Zahlen. Dasselbe Verhältniss trat hervor an dem hierauf noch untersuchten Oberschenkelbein der erwachsenen Katze. Gegen die Knochenenden hin liegende Stücke ertrugen nur eine etwas geringere Last. Davon waren jedoch wieder die äussersten Endstücke ausgenommen.

Sucht man unter Zugrundelegung dieser Erfahrungen die Strebfestigkeit eines erwachsenen menschlichen Oberschenkelbeins zu bestimmen und denkt man sich denselben zunächst wieder als regelmässige Hohlsäule von den oben angegebenen Dimensionen (14 Mm. äusserem, 6 Mm. innerem Radius), 450 Mm. Länge, senkrecht zur Längenaxe abgeschnittenen Endflächen, so würde der gesuchte Werth nicht unter $\frac{3}{4}$ der rückwirkenden Festigkeit derselben Röhre betragen.

Bedient man sich zu dieser Bestimmung der von Grashof vorgeschlagenen theilweise empirischen Formel[1]), nach welcher die Strebfestigkeit der Säule berechnet wird wie ein auf Zerdrückung beanspruchter Körper, während der Festigkeitsmodul eine Modification erfährt, welche Länge, Querschnittsform, Befestigungsart und Materialbeschaffenheit in besonderer Weise berücksichtigt, so ergibt sich eine etwas geringere Zahl[1]). Der Einfluss der Befestigungsart ist für den Grad der Strebfestigkeit einer Säule nun aber ein so tiefgrei-

---

1) Grashof, Festigkeitslehre. Bedeutet P die Belastung, f die Querschnittsfläche, D den Druckfestigkeitsmodul, E den Elasticitätsmodul, l die Länge, d den äusseren, d_1 den inneren Durchmesser, so haben wir

$$P = \frac{f \cdot D}{4\pi^2 \cdot \frac{l^2}{\frac{d^2 + d_1^2}{16}} \cdot \frac{E}{D} + 1}$$

Setzt man die obigen Werthe ein, so ergibt sich die Strebfestigkeit zu 4635 Kilogramm.

fender, dass es nöthig ist zu begründen, welche Befestigungsart der Rechnung zu Grunde gelegt wurde. Es ist diejenige, welche auch den ausgeführten Versuchen entspricht: senkrecht die Längenaxe begrenzende Endflächen von genügendem Querschnitt stehen auf ebener Unterstützungsfläche und werden mit ebenen Flächen belastet, so dass die Säule bei der Biegung an beiden Enden sich tangential an die Kraftrichtung anzuschliessen genöthigt ist.

Längsschnitt und Querschnitt und ihr Einfluss auf die Strebfestigkeit.

In dem Vorausgehenden ist der Einfachheit halber der Berechnung der Strebfestigkeit eine sehr einfache Gestalt, die des Hohlcylinders zu Grunde gelegt und dieser als vollständig aus compacter Substanz gebildet angenommen. Der Querschnitt eines Röhrenknochens ist aber höchst selten ein Kreis, der Längsschnitt noch viel weniger ein Rechteck. Es fragt sich also, ob und welchem mathematischem Körper seine Gestalt am meisten sich nähert.

Man wird der Wahrheit viel näher kommen, wenn man die grossen Röhrenknochen als Kegel, wenn man will, als Doppelkegel betrachtet; doch mit der Erweiterung, dass deren Querschnitt häufiger eine Ellipse sei als ein Kreis; oder wenn man sie als Pyramiden und vorzugsweise dreiseitige Pyramiden betrachtet. So ist die Tibia des Menschen und vieler Säugethiere wesentlich eine dreiseitige Pyramide, das Oberschenkelbein wesentlich ein Kegel. Diese Verhältnisse sind einer genaueren Beachtung zu würdigen. Es wird im Weiteren auch nicht sowohl beabsichtigt sein können, die oben angegebenen Zahlenwerthe zu modificiren, als ein Verständniss der Knochenformen mit Rücksicht auf ihre mechanische Bedeutung zu gewinnen.

Während einerseits die Grundform der Röhrenknochen sehr weit von der Cylinder- oder prismatischen Form abweichen kann, ohne desshalb im Mindesten unregelmässig zu sein, ist andererseits der Einfluss zu berücksichtigen, welchen die bei den meisten Röhrenknochen hervortretende Entfernung der Knochenaxen von der geraden Richtung und deren Umwandlung in eine Curve auf die Strebfestigkeit ausübt.

1) Abweichung der Knochenaxen von der Geraden.

Sie bedarf kaum einer Auseinandersetzung. Der Gewinn an federnder Kraft, welchen ein Knochen oder eine Knochencombination (Hermann Meyer) durch Krümmung der Längenaxe erfährt, sei die Curve das Segment eines Kreises (Oberschenkel) oder eine vollständige wenn auch modificirte Rankenlinie (Wirbelsäule) oder ein Theil einer solchen (Tibia, Schlüsselbein), ist schon oft hervor gehoben worden. Bekannt ist auch, dass durch gewisse Krümmungsformen der Brechungsquerschnitt, den man auch den gefährlichen nennt, bezeichnet werde (Schlüsselbein, Schienbein, Verbindung des Schenkelhalses mit dem Schenkelbein). Zeigt sich die Längenaxe eines ganzen Knochens so stark gebogen, dass sie selbst den Erfolg einer winkeligen Knickung bedingt (Hals und Körper des Schenkelbeins), so musste zur Begegnung der hiermit gesetzten grossen Schwächung des Knochens dieser in

anderen Momenten eine Stärkung erfahren: durch ausgleichenden Gewinn im Querschnitt. Aus diesem Grunde und weil er das Schienbein an Länge übertrifft, übertrifft er letzteres in Bezug auf Querschnitt, ohne dass dasselbe darum an Strebfestigkeit dem Schenkelbein nachstehen müsste. Hiezu kommt übrigens noch, dass das Schienbein eine seitliche Führung durch das Wadenbein besitzt, während das Schenkelbein allein steht.

2) Wirkung des Querschnitts.

Weder der rechteckige noch selbst der kreisförmige Querschnitt ist, wie schon angedeutet oder bekannt, der von der Natur für Röhrenknochen oder lange Knochen nachahmende Knochencombinationen typisch verwendete, sondern der dreiseitige und elliptische. Dass das dreiseitige Prisma eine häufige Eigenthümlichkeit des Schaftes von Röhrenknochen sei, ist längst beschrieben und darauf aufmerksam gemacht worden; weniger, dass auch der elliptische Querschnitt grosse Verbreitung besitze. Die meisten der für gewöhnlich ohne Messung für Kreisformen gehaltenen Querschnitte haben sich als Ellipsen herausgestellt. Selbst das Oberschenkelbein der Katze, dessen Mittelstück einem regelmässigen Hohlcylinder sehr nahe kommt, hat elliptischen Querschnitt.

Es fragt sich, ob diesen Querschnittsformen ein Motiv zu Grunde liegt oder ob sie nur ein zufälliges Ereigniss darstellen, zufällig in dem Sinne, dass nicht ein mechanischer Sinn in der Bevorzugung dieser Form verborgen sei. Diese Frage braucht nur gestellt zu werden, um sofort ihrer Beantwortung in ersterem Sinn sicher zu sein: Niemand wird hier einen solchen Zufall annehmen. Der mechanische Sinn liegt einfach in dem Verhältniss des Dickendurchmessers eines auf Biegung oder Strebfestigkeit beanspruchten Balkens zum Biegungsmoment. Unter Dickendurchmesser ist die mit der Biegungsrichtung parallele Dimension des Balkens verstanden. Ein parallelepipedischer Balken, welcher doppelt so breit ist als ein anderer, trägt bei seiner Biegung bekanntlich nur doppelt soviel als dieser; ein Balken von doppelter Höhe aber trägt viermal so viel als ein Balken von der einfachen Breite und einfachen Höhe. Sind b und h die Breite und Höhe des einen, $\frac{l}{3}$ und $3h$ die des andern, gleichlangen und aus demselben Material bestehenden Parallelepipedes, so ist zwar das Gewicht beider Körper gleich, dennoch aber trägt der letztere 3mal soviel als der erstere[1]).

Bei gleicher Querschnittsfläche oder gleichem Gewicht zweier Körper, von welchen der eine einen kreisförmigen, der andere elliptischen Querschnitt besitzt, dessen grosse Axe in der Ebene der Biegungsrichtung liegt, sind aus demselben Grunde die Tragmomente einander nicht gleich, sondern der elliptische Querschnitt leistet mehr als der kreis-

---

1) Bedeutet P die Belastung, B den Festigkeitsmodul, b und h Breite und Höhe, f die Querschnittsfläche, l die Länge eines an dem einen Ende befestigten, am freien Ende belasteten Parallelepipedes, so haben wir für den Bruch $Pl = bh^2 \frac{B}{6} = fh. \frac{B}{6}$.

förmige[1]). Dasselbe gilt auch für den dreieckigen Querschnitt. Man verwandle einen rechteckigen Querschnitt in einen dreieckigen von doppelter Höhe aber gleichem Flächeninhalt, um sofort davon überzeugt zu sein. Ebendahin gehört, dass ein rechteckiger Querschnitt mit senkrecht gestellter Diagonale mehr leistet, als mit der gleichen in anderem Winkel liegenden Diagonale.

Als ein Beispiel der letzteren Art am Knochengerüste ist der Querschnitt durch das menschliche Oberarmbein an einigen Stellen seiner Länge zu erwähnen. Der elliptische und dreiseitige Querschnitt ist so häufig, dass ich hier nur des dreieckigen Querschnitts der Brustwirbelsäule gedenke, dessen Begründung ganz unter denselben Gesichtspunkt fällt.

Prüft man mit Rücksicht hierauf vollständige Reihen von Querschnitten durch das menschliche Oberarm-, Oberschenkel- und Schienbein, die von oben nach abwärts in Abständen von etwa 4 Cm. am Knochen aufeinanderfolgen, ebenso aber auch die Querschnitte der einzelnen Glieder der Wirbelsäule, so bemerkt man ausserdem leicht das eigenthümliche Verhältniss, dass in den mittleren Regionen je einer Reihe der sagittale den frontalen, an den Enden dagegen der frontale den sagittalen Durchmesser an Grösse constant übertreffe. Der Erfolg dieser Combination ist nach dem Vorausgegangenen leicht verständlich. Diese alternirende Verstärkung der Widerstandskraft gegen Biegung in zwei aufeinander senkrechten Richtungen findet sich umgekehrt besonders da nicht durchgeführt, wo schon mehrere Knochen nebeneinander liegen und mit einander verbunden sind.

Welchen Gewinn an Biegungsfestigkeit die Röhrenknochen durch die Volumvergrösserung der Gelenkenden erfahren, wenngleich diese Volumvergrösserung vorwiegend nur auf einer Aufblätterung der Compacta beruht, ist bereits von Hermann Meyer gebührend hervorgehoben worden. Es ist begreiflich, dass dieser Gewinn an Biegungsfestigkeit nicht allein das umfangreichere Gelenkende betreffe, sondern auf die Festigkeit des Mittelstücks selbst auf das Günstigste zurückwirken müsse; denn letzteres wird nunmehr durch gleiche äussere Kräfte weit geringere Biegung erleiden als ohne jene Anordnung.

Ob die Querschnittsverhältnisse der Knochen in Bezug auf Strebfestigkeit in der Weise geordnet sind, dass für den Fall einer übermässigen Belastung die Wahrscheinlichkeit eines Bruches in allen Querschnitten die gleiche ist, lässt sich nicht allgemein beantworten. Zur Erfüllung dieser Forderung würde gehören, dass eine betreffende Knochensäule von oben nach abwärts in der Art eines Kegels oder einer Pyramide in bestimmtem Grade zu- oder abnehmende Querschnitte besässe. Wir sehen in der That an vielen Röhrenknochen das Volumen eines Gelenkendes und der mit ihm verbundenen Knochenhälfte dasjenige der anderen Hälfte überwiegen. Beispiele sind das Oberschenkel- und Schienbein, das

---

1) Liegt die grosse Halbaxe a einer Ellipse in der Ebene der Kraftrichtung, so haben wir, wenn die übrigen Bezeichnungen die obige Bedeutung besitzen, $Pl = fa\frac{B}{4}$; beim kreisförmigen Querschnitt mit dem Radius r aber $Pl = fr\frac{B}{4}$. Bei gleichem Gewicht der beiden Körperformen ist das Verhältniss des Festigkeitsmomentes der ersten zur zweiten Form $= \frac{a}{r}$.

Oberarmbein, Ellenbogenbein und die Armspindel des Menschen, selbst die kleineren Röhrenknochen von Hand und Fuss. Die Gegenwart einer zweiten Aufblätterung an der schwächeren Hälfte eines Röhrenknochens (beim Oberschenkelbein der oberen, beim Schienbein der unteren) würde dieser Auffassung nicht hemmend in den Weg treten. Denn sie ist unter allen Umständen zur Gelenkbildung mehr oder weniger nothwendig.

Wenn man aber auch an gewissen Knochenformen eine Annäherung an Körper von gleicher Strebfestigkeit mit Bezug auf den Querschnitt erkennen möchte, so erleidet doch die aus solcher Bildung hervorgehende für die Tragkraft günstige Wirkung eine Einbusse durch den Einfluss der Krümmungen der Längenaxe der Knochen, die, wie schon bemerkt, für viele Knochen einen gefährlichen Querschnitt bedingen.

Ergebnisse.

1. Das specifische Gewicht der frischen Compacta des Oberschenkel- und Schienbeins eines 30jährigen Mannes betrug 1901; einer 56jährigen Frau = 1825; einer Katze = 2101; eines Kalbes = 1889; eines Rindes = 2024; eines Hausschweins = 1965; eines Wildschweins = 2060.
   Das spec. Gewicht frischer Spongiosa der menschlichen Oberschenkelknorren war = 1197; eines Fischwirbels (Wels) = 1584; eines menschlichen Rippenknorpels = 1112.
2. Austrocknung frischer Knochenstäbchen vermindert deren Dimensionen. Stäbchen von 8 Centimeter Länge schrumpften um $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{2}$ Millimeter. Frische Schädel haben einen grösseren Rauminhalt als getrocknete. S. H. Welcker, Wachsthum und Bau des Schädels.
3. Die »Knochenhöhlen« sind nicht lufthaltig, sondern enthalten Zellen.
4. Der Rauminhalt der Knochenhöhlen und Knochenkanälchen der Compacta verhält sich zu dem der Grundsubstanz annähernd wie 1 : 16.
   Der Rauminhalt der Gefässkanäle beträgt gegen $\frac{1}{30}$ der Knochensubstanz.
   Die nichttragkräftige Knochensubstanz ist demnach etwa = $\frac{1}{11}$ des Volums der Compacta.
5. Die umfassenden und Haversischen Lamellensysteme stellen Hohlsäulen dar, mit allen mechanischen Eigenschaften solcher.
6. Ein Querschliff vom Mittelstück des menschlichen Oberschenkelbeins zeigte gegen 3200, einer des Schienbeins 2500 Haversische Säulen.
7. Die nächste Auskleidung der Haversischen Kanäle ist eine endotheliale. Sie begrenzt, wie ich es vorläufig auffasse, circumvasculäre Lymphkanäle. Die Mitte wird von einem oder mehreren Blutgefässen eingenommen.
8. Die Venae nutritiae der Röhrenknochen besitzen innerhalb derselben keine Muscularis.
9. Die umfassenden Lamellen werden an vielen Ansatzstellen starker Sehnen und Bänder durchbrochen, mit Blosslegung und Umgestaltung Haversischer Säulen zu reichgezackten Ursprungsfeldern. Der Ursprung starker Sehnen und Bänder wirkt auf das Gefüge der Compacta an mehreren Orten dadurch noch tiefgreifender, dass sie hier in eine starkmaschige Spongiosa sich auflöst, mit dem Erfolge besserer Verwerthung der elastischen Kräfte des Knochens (z. B. Trochanter major und minor, Tuberositas radii u. s. w.).
10. Die Festigkeit der Sehnenverbindung mit dem Knochen hängt ab von der Grösse der Verbindungsfläche, die nach den Grenzen und den Unebenheiten der Fläche sich abmisst; von der zahlreichen Gegenwart Sharpey'scher Fasern; von Schlingenbildung; vom Luftdruck.

11. Die typische Belastung der Extremitätenknochen ist die Spannung ihrer Musculatur.
12. Das Extremitätenskelet lässt sich auffassen als eine Gruppe von Gegenresultirenden, deren Componenten durch antagonistische Muskelkräfte gegeben sind.
13. Die Gestaltung der Wirbelsäule einschliesslich des Schädels wird dagegen ausser von den Muskeln noch von dem Centralnerven- und Darmsystem, nicht gesetzt, sondern beeinflusst.
14. Das Verhältniss des Knochengewichtes einer Extremität zu ihrem Muskelgewicht zeigt bei verschiedenen Species sehr grosse Unterschiede. Die Kraftleistung eines Knochens ist aber nicht nach der Masse allein, sondern nach der Form ihrer Verwendung zu beurtheilen.
15. Die Tibia einer gelähmten Extremität wog 198, die der nicht gelähmten Seite 281 Gramm.
16. Die Elasticitäts- und Festigkeitsverhältnisse des Knorpels gestatten nicht die Ausbildung langer, einem schwankenden Druck ausgesetzter Säulen. Auf diesen Umstand ist die Gelenkbildung zurückzuführen. Ohne Knorpel oder Aequivalent keine wahre Gelenkbildung.
17. Die absolute Festigkeit der frischen, normal warmen menschlichen Compacta im mittleren Alter schwankt zwischen 9,25 und 12,41 $\frac{\text{Kgr.}}{\square\text{Mm.}}$;

    die rückwirkende zwischen 12,56 und 16,8.

    Die rückwirkende übertrifft also die absolute. Letztere steht der des Messings nahe; erstere übertrifft die von Holz, Granit und Blei etwa um das Doppelte.

    Austrocknung vermehrt, Erwärmung vermindert die Festigkeit. Im Alter nimmt die absolute Festigkeit mehr ab als die rückwirkende. Jene Abnahme bedingt die grössere Brüchigkeit der Knochen älterer Personen gegenüber einwirkenden Biegungsgewalten.
18. Die frische Compacta des Kalbes besass 8,93 absolute, 12,26 rückw. Festigkeit.

die des Rindes	11,46	»	13,31	» »
die trockne des Hausschweins	7,3	»	11,73	» »
» » Wildschweins	10,29	»	14,71	» »

19. Frische Spongiosa eines menschlichen Lendenwirbels hatte 0,84, des Oberschenkelknorrens 0,96 rückwirkende Festigkeit.
20. Die trockne Compacta des Schienbeins vom Rinde zeigte 17,91, calcinirt 5,96, entkalkt 2,72 rückwirkende Festigkeit. Die absolute des entkalkten betrug 1,51.
21. Menschlicher Rippenknorpel hatte 1.57 rückwirkende und 0,17 absolute Festigkeit.
22. Der Elasticitätsmodul des Knochenknorpels (nach Dehnungsversuchen) $= 3{,}888 \frac{\text{Kgr.}}{\square\text{Mm.}}$

    » » Rippenknorpels . . . . . $= 0{,}875$ »
23. Die zur Längenaxe des Knochens parallele Druckrichtung ergibt den höchsten Festigkeitsmodul. Die mit beiden Horizontalaxen parallele, den Faserverlauf senkrecht treffende Druckrichtung gibt niedrigere, aber unter sich nicht abweichende Werthe.
24. Längere Dauer einer Belastung wirkt einem höheren Gewicht gleich.
25. Der Elasticitätsmodul der frischen, warmen Compacta des Oberschenkelbeins eines 46jährigen Mannes war 1982—2099; des Schienbeins 1871—2041; des Oberschenkelbeins des Rindes 2532 $\frac{\text{Kgr.}}{\square\text{Mm.}}$

    Trocknung und Erkältung erhöht den Elasticitätsmodul.

    Biegungen nach den Queraxen, oberflächlicher oder tiefer gelegener Substanz verschiedener menschlicher Knochen zeigen keine constanten Unterschiede unter sich.

    Der Elasticitätsmodul des Knochens ist der doppelte des Holzes und $\frac{1}{3}$ desjenigen des Messings.
26. Die Durchbiegungen sind den Belastungen proportional bis jenseits der Elasticitätsgrenze.
27. Die Elasticitätsgrenze des natürlichen Zustandes wird erreicht durch eine Belastung, welche zwischen dem 1. und 2. Viertel des Bruchgewichtes liegt.

28. Auf den Verlauf der elastischen Nachwirkung haben Erschütterungen einen sehr bedeutenden Einfluss, sei es in Bezug auf ihre vorschreitende oder rückgängige Phase.
29. Auf den Verlauf der elastischen Nachwirkung und den Eintritt des Rückstandes ist die Belastungsdauer von grosser Wirkung. Langdauernde Belastung gefährdet und stört die Integrität des Knochens durch Gewichte, die bei kurzer Einwirkung nicht einmal die Elasticitätsgrenze überschreiten.
30. Der Festigkeitsmodul der Abscheerung (Schubfestigkeit) der Compacta beträgt bei der zur Faser senkrechten Druckrichtung = 11,85 $\frac{\text{Kgr.}}{\square\text{Mm.}}$, bei parallel der Faser laufender Druckrichtung nur 5,03.
Da bei der Biegung eines Körpers die Schubspannung in der neutralen Axe ihren höchsten Werth erreicht, so würden Verschiebungen am Knochen frühzeitig eintreten, wenn er nicht hohl wäre. Auch von dieser Seite ergibt sich also ein Nutzen der Bildung hohlcylindrischer Knochenformen.
31. Die Torsionsfestigkeit der Compacta betrug im Mittel aus 4 Versuchen 8, im höchsten Fall 9,307; die des Rippenknorpels 0,239 $\frac{\text{Kgr.}}{\square\text{Mm.}}$.
32. Die Strebfestigkeit eines Parallelepipedes von 45 Mm. Länge, quadratischem Querschnitt von 3 Mm. Seite, aus dem Oberschenkelbein eines 33jährigen Mannes betrug im Mittel 108 Kilogramm; die rückwirkende Festigkeit von Würfeln desselben Knochens, von 3 Mm. Kante, war 150 Kilogramm. Die Stäbchen ertrugen also bei 15maliger Länge gegen $\frac{1}{4}$ weniger Gewicht als die Würfel.
Vom Oberschenkelbein der Katze wurde der Schenkelhals abgesprengt mit 142,5 Kilogramm. Das Mittelstück von 6 Centimeter Länge ertrug 260 Kilogramm.
33. Periost und Muskeln sind als »Führungen« von günstigem Einfluss auf die Strebfestigkeit der Knochen.
34. Die Diaphyse des menschlichen Oberschenkelbeins zerreisst bei einer Zugbelastung von 5607 Kilogramm.
Derselbe Knochen, als regelmässiger Hohlcylinder gedacht, von 45 Centimeter Länge, 14 Mm. äusserem, 6 innerem Halbmesser würde bei Ausschluss seitlicher Biegung zerdrückt durch 7787 K.; sind seitliche Biegungen möglich (Beanspruchung auf Strebfestigkeit), durch etwa $\frac{3}{4}$ dieses Werthes.
Derselbe Knochen, quer gelagert, zur Hälfte befestigt, 20 Cm. frei, bricht durch eine das freie Ende ergreifende Belastung von 383 Kilogramm.
35. Der wirkliche Röhrenknochen unterscheidet sich von dem eben benützten schematischen in Hinsicht der Krümmungen seiner Längenaxe und hinsichtlich der Querschnittsänderungen in verschiedenen Höhen. Die Aufblätterung und der Substanzverbrauch überwiegt in der Regel an einem Ende. Der Form und Leistung nach ergibt sich hieraus eine Annäherung an Körper von gleicher Streb- oder Zerknickungsfestigkeit, in welchen ein sogenannter gefährlicher Querschnitt nicht besteht.
36. Ein gefährlicher Querschnitt wird aber an mehreren Knochen hervorgebracht durch die bekannten Krümmungen der Längenaxe, die als Rankenlinie (Wirbelsäule) oder Abschnitte einer solchen (Tibia u. s. w.) aufgefasst werden können.
Die »Bruchsicherheit« ist immerhin sehr beträchtlich, wie sich aus dem Verhältniss des Körpergewichtes zur Festigkeit der dasselbe tragenden Knochen ergibt.
37. Das häufige Vorkommen elliptischer und dreiseitiger Querschnittsformen von Röhrenknochen ist nicht zufällig, sondern begründbar. Ihre Verwendung beruht auf Materialablagerung am günstigsten Platze und lässt sich zurückführen auf den überwiegenden Einfluss der zur Druckrichtung parallelen Dimension (= Dicke) auf die Biegungsfestigkeit.

38. Ist dagegen irgendwo die kleinere Dimension parallel zur Biegungsebene gestellt, so liegen entweder mehrere Knochen nebeneinander oder eine stärkere Federung ist die unmittelbare Folge.

Zu den Tafeln.

Tafel I. Abbildung eines Querschliffs aus dem Beginn des mittleren Drittels des menschlichen Schienbeins. Die mediale Wand liegt rechterseits. Die Querschnitte der Gefässkanäle sind als schwarze, einige grössere als weisse Punkte und Flächen bemerkbar. An einer Stelle der Crista liegen die Haversischen Säulen frei zu Tage. Die Figur ist zur Erwägung in mechanischer Richtung bestimmt. $\frac{7}{1}$.

Tafel II. Fig. 1. Querschliff durch den menschlichen Radius, im Bezirk seiner Tuberosität. Die Figur zeigt den Einfluss der Muskelwirkung auf die Compacta. $\frac{3}{1}$.

Fig. 2. Ein Stückchen der Tuberositas humeri im Längsschnitt. Die Hauptneigung der Zacken liegt in der Flucht der Deltoides-Sehne. $\frac{20}{1}$.

Fig. 3. Links 2 kernhaltige Knochenzellen aus dem Humerus von Salamandra maculosa. Rechts eine Knochenzelle aus einem Wirbel des Welses. $\frac{700}{1}$.

Fig. 4. Blut-Capillaren in einem Längsschnitt durch die entkalkte Ulna einer Katze. Sie sind vom Endothel der Haversischen Säulen durch einen spaltförmigen Raum getrennt, den ich als Ausdruck circumvasculärer Lymphkanäle auffasse. $\frac{400}{1}$.

Von den Blutgefässen der Knochen sei gleichfalls hier nur kurz bemerkt, dass die Muscularis der Arterien innerhalb der Compacta bereits mit 0,06 Mm. Gefässdurchmesser aufhört (Ulna der Katze). Die Venen, auch die Hauptstämme, besitzen innerhalb der Compacta überhaupt keine Muscularis als besondere Wand, sondern nähern sich den Breschet'schen Kanälen (Canalis nutritius tibiae des Kalbes).

Fig. 5. Seitenansicht eines Schwanzwirbels von Gadus morrhua, zur Verdeutlichung der Muskelwirkung auf das Gefüge der Wirbel. $\frac{5}{1}$. —

Berichtigung.

Seite 7 Zeile 13 von oben lies: bedingt statt beginnt.
» 17 » 10 » unten » unteren Extremität statt oberen Extremität.
» 41 » 11 » oben » 2323 statt 2337.

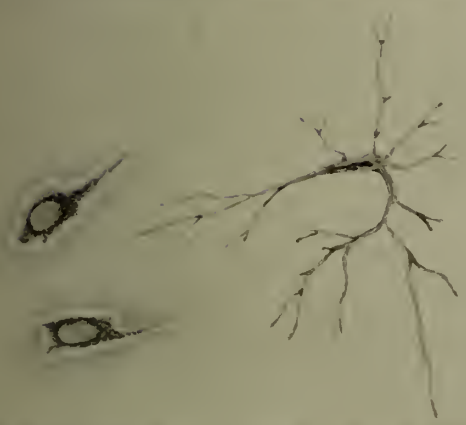
Druck von Breitkopf und Härtel in Leipzig.

Taf. II.

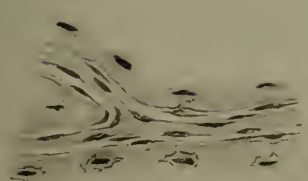
1.

2.

3.



4.



5.